

统模型的优点,同时柔化控制信号,减轻甚至避免一般滑模控制容易出现的抖振现象.

1 车辆视觉预瞄运动学模型

人们在驾驶的过程中往往会习惯性地提前观察前方的道路,对前方的道路情况预先进行估计,根据经验在适当的时候提前转动方向盘,来保证车辆按照驾驶者的意图行驶.对于基于视觉的智能车辆来说,需要根据预瞄点处的横向偏差和方位偏差等信息,按照一定的策略来控制车辆按照参考路径行驶.

本文研究的智能车辆视觉导航系统由 CCD 摄像机、图像采集卡、监视器和导航计算机四部分组成.通过前置 CCD 摄像机实时获得前方道路的环境信息,通过串口将获取的信息传递给计算机,然后对获取的信息进行数字图像处理,获取车辆预瞄点处的横向偏差和方位偏差.车辆视觉预瞄运动学示意图如图 1 所示.

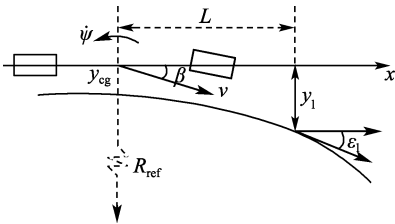


图 1 车辆视觉预瞄运动学示意图

Fig. 1 Sketch map of vehicle preview kinematics

从图 1 所示推导可知,基于视觉的预瞄运动学模型可以表达为^[6-8]

$$\begin{aligned}\dot{y}_l &= v_x \epsilon_l - v_y - \dot{\psi} L \\ \dot{\epsilon}_l &= v_x \kappa_l - \dot{\psi}\end{aligned}\tag{1}$$

式中: y_l 为车辆视觉预瞄点处车辆中心线与路径的横向偏差(m); ϵ_l 为车辆视觉预瞄点处车辆中心线与路径切线的夹角(rad); v_x 为车辆纵向速度; v_y 为车辆横向速度; L 代表预瞄距离(m); κ_l 为路径曲率; ψ 为车辆横摆角.

2 综合偏差的确定

为了使模糊控制系统结构的复杂性降低,算法更易于实现,本文将控制目标从综合偏差转为

滑模切换函数,只要施加控制使滑模切换函数为零,综合偏差也会渐近到达零点,因此选择综合偏差作为滑模切换函数的参数.综合偏差即横向偏差和方位偏差融合后的偏差,由于横向偏差和方位偏差都具有量纲,需要将它们量纲一化,将量纲一化后的横向偏差 $\bar{y}_l$ 和方位偏差 $\bar{\epsilon}_l$ 融合为 e_l ,并定义 e_l 为综合偏差,其表达式为

$$e_l = \eta_1 \cdot \bar{y}_l + \eta_2 \cdot \bar{\epsilon}_l\tag{2}$$

式中: η_1 、 η_2 为系数,且 $\eta_1 + \eta_2 = 1$.

3 控制器设计

为了克服常规滑模横向控制的不足,本文设计了一种模糊滑模控制的方法,它既能够缩短滑模到达时间,又能够达到削弱抖振的目的.通过将智能车辆视觉系统采集到的横向偏差 y_l 和方位偏差 ϵ_l 融合为综合偏差 e_l ,并作为滑模切换函数 s 的参数,将滑模切换函数及其变化率作为模糊控制的输入,前轮转向角 δ_f 作为输出来控制智能车辆的横向运动,其控制器结构如图 2 所示.

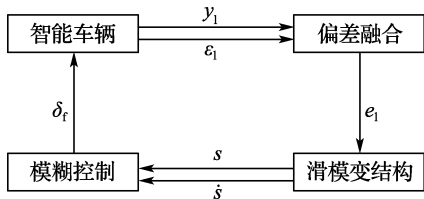


图 2 模糊滑模控制器结构图

Fig. 2 Block diagram for fuzzy sliding mode controller

3.1 滑模面

根据式(2)所得到的综合偏差 e_l 及其变化率 $\dot{e}_l$,设定滑模变结构控制的切换函数为 s ,其表达式为

$$s = c_1 e_l + \dot{e}_l\tag{3}$$

如果达到理想的滑模控制,则 $\dot{s} = 0$,联合式(3)可以得到

$$\dot{s} = c_1 \dot{e}_l + \ddot{e}_l = 0\tag{4}$$

式中: c_1 为常数, $\dot{e}_l$ 为综合偏差变化率, $\ddot{e}_l$ 为综合偏差变化率的导数.

3.2 模糊滑模控制

为了达到通过模糊控制思想优化滑模控制器的目的,本文选择 s 和 $\dot{s}$ 作为模糊控制器的输入变

量,选择前轮转角 δ_f 作为模糊控制器的输出变量. 为了克服外界干扰及参数不确定性的影响,满足运动存在的条件,并且削弱滑模控制所引起的抖振,根据经验,利用模糊控制规则来调整控制变量 δ_f 大小,确保存在和到达条件 $s\dot{s} < 0$ 成立.

本文采用双输入单输出模糊控制器,由输入变量 s 、 $\dot{s}$ 和输出变量 δ_f 构成,将它们分别转化到论域为 $X[-1,1]$ 、 $Y[-1,1]$ 和 $Z[-1,1]$ 的模糊集 F 、 F_c 和 T ,输入变量 s 、 $\dot{s}$ 和输出变量 δ_f 对应模糊子集语言变量均为 $\{\text{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}\}$,其中NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB分别称为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 输入变量 s 、 $\dot{s}$ 和输出变量 δ_f 的模糊子集隶属度函数由Z形函数、三角函数和S形函数组成,如图3~5所示.

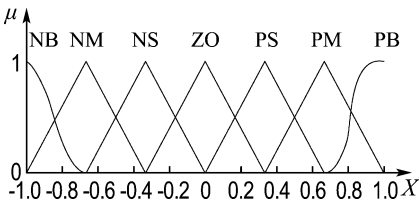


图3 滑模面 s 的隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of sliding mode surface s

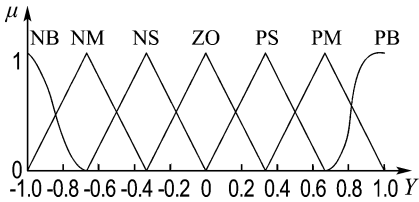


图4 滑模面 $\dot{s}$ 的隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of sliding mode surface $\dot{s}$

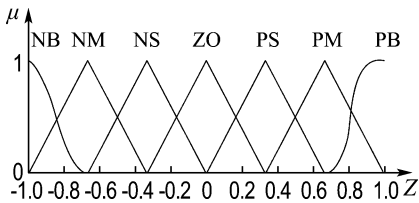


图5 前轮转角 δ_f 的隶属度函数

Fig. 5 Membership functions of front wheel steering angle δ_f

3.3 模糊控制规则

模糊控制规则是模糊控制器的核心,决定着

模糊控制器的性能,它通过模糊逻辑的模糊条件语句来表征人类驾驶行为的经验知识,提供了一种简单描述人类驾驶行为的方法. 本文的模糊控制规则由49条“IF-THEN”规则组成,即 $R = \{R_1, \dots, R_{49}\}$,其中每一条规则都由下面形式的“IF-THEN”模糊语句构成:

R_i : IF s is F_i AND $\dot{s}$ is F_{ci} , THEN δ_f is T_i

其中 F_i 、 F_{ci} 和 T_i 分别为输入变量 s 、 $\dot{s}$ 和输出变量 δ_f 模糊子集的语言变量:

$\{F_i, F_{ci}, T_i\} \in \{\text{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}\}$

根据人类驾驶车辆积累的经验及控制规则的要求,本文所设计的模糊控制规则如表1所示.

表1 模糊控制规则
Tab. 1 Rule-base of FSMC

s	$\dot{s}$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

3.4 模糊推理及反模糊化

作为模糊控制的核心,模糊推理根据模糊控制规则给出合适的控制量,本文采用比较常用的Mamdani推理法.

模糊推理后产生的控制量,需要通过反模糊化转换为智能车辆执行机构可以接受的精确量. 本文采用重心法进行反模糊化^[8].

$$\delta_{fb} = \frac{\sum_{i=1}^{49} (\mu_{s_i} \times \delta_{fi})}{\sum_{i=1}^{49} \mu_{s_i}} \tag{5}$$

式中: δ_{fb} 表示模糊控制器输出的反模糊以后的精确值, δ_{fi} 表示模糊控制论域中的值, μ_{s_i} 表示 δ_{fi} 的隶属度的值.

4 仿真分析

为了测试本文所设计的横向控制策略对参考

路径的跟踪效果,在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真研究.本文采用十二自由度整车动力学仿真模型^[9],主要模型参数参考课题组开发的 DLUIV-1 型智能车辆试验样车,车辆参数如表 2 所示.

表 2 DLUIV-1 车辆参数

名称	单位	数值
整车质量 m	kg	2 370
转动惯量 I	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	3 059
质心至前轴距离 l_f	m	1.107
质心至后轴距离 l_r	m	1.403
前轮轮胎侧偏刚度 C_f	kN/rad	44
后轮轮胎侧偏刚度 C_r	kN/rad	44
轮距 b	m	1.524

4.1 工况 I 仿真分析

仿真所用的参考路径 I 如图 6 所示,0~10 s 为直线,检验控制器跟踪直线的效果;10~20 s 为曲率为 0.005 m^{-1} 的弯曲路径,检验控制器跟踪弯路的效果;20~30 s 为直线,检验从弯路变为直路时控制器的跟踪效果;30~40 s 为曲率为 -0.01 m^{-1} 的弯曲路径,检验从直路变为弯路时控制器的跟踪效果;40~50 s 是曲率为 0.008 m^{-1} 的弯曲路径,检验从曲率 -0.01 m^{-1} 急剧变为 0.008 m^{-1} 这种恶劣工况下控制器对路径的跟踪效果;最后是一段直线.

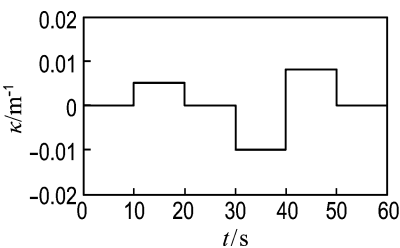


图 6 参考路径 I

Fig. 6 Reference path I

设置车辆的初始横向偏差为 0.2 m,初始方位偏差为 0.1 rad,滑模参数 $c_1=10$,纵向车速 $v_x=5 \text{ m/s}$,预瞄距离 $L=5 \text{ m}$.图 7 给出了分别采用滑模控制器和模糊滑模控制器跟踪参考路径 I 的过程中,控制器输出的车辆前轮转角变化的对比

曲线.可以看出采用滑模控制器时,在路径曲率发生变化的位置会有抖振产生,这会影响车辆的稳定性;而采用模糊滑模控制方法的控制器能很好地削弱这种抖振,提高轨迹跟踪的稳定性.图 8 给出了采用模糊滑模控制算法车辆的横向和方位偏差响应曲线,可以看出横向偏差控制在 $\pm 0.015 \text{ m}$,方位偏差控制在 $\pm 0.029 \text{ rad}$,表明该控制算法可以准确稳定地跟踪不同曲率组成的参考路径.

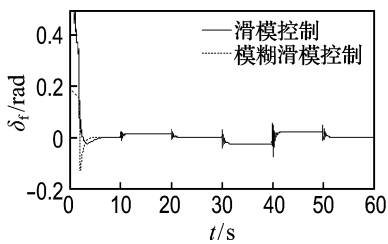
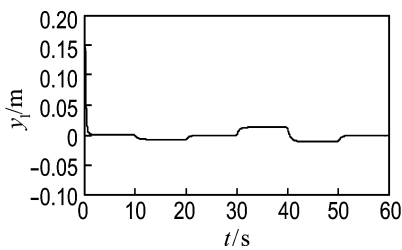
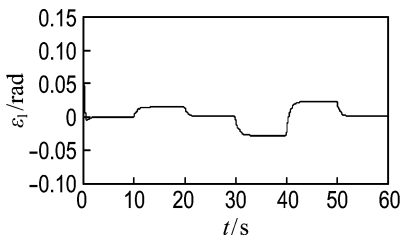


图 7 前轮转角响应曲线

Fig. 7 The response curve of front wheel steering angle



(a) 横向偏差



(b) 方位偏差

图 8 $v_x=5 \text{ m/s}$ 时横向和方位偏差仿真结果
Fig. 8 Simulation results of lateral and direction errors when $v_x=5 \text{ m/s}$

由于车辆在行驶过程中,其各种物理参数是不断变化的,需要通过仿真来检验参数改变对车辆路径跟踪性能的影响,测试所开发的控制算法对车辆参数变化的适应性.

首先,令车辆荷载在 $\pm 400 \text{ kg}$ 范围内按正弦曲线变化,此时的横向和方位偏差响应如图 9 所示,横向偏差控制在 $\pm 0.023 \text{ m}$,方位偏差控制在

$\pm 0.03\text{ rad}$,可以看出所提出的控制算法对车辆荷载的变化有比较强的适应性。

然后,将纵向车速提高至 $v_x=10\text{ m/s}$,此时的横向和方位偏差响应如图 10 所示,可以看出横向偏差控制在 $\pm 0.01\text{ m}$,方位偏差控制在 $\pm 0.02\text{ rad}$,亦可以看出在车速变化的情况下所提出的控

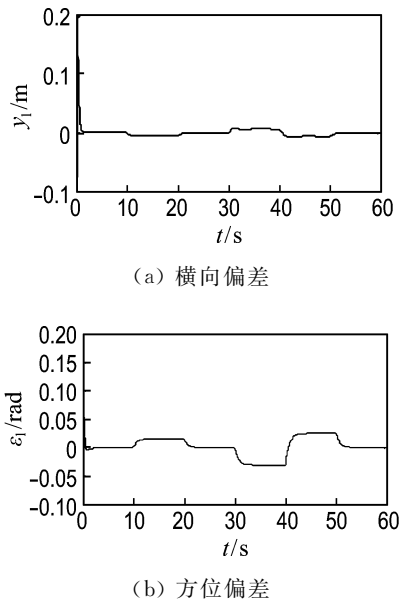


图 9 荷载按正弦变化时横向和方位偏差仿真结果

Fig. 9 Simulation results of lateral and direction errors when vehicle's mass change according to sinusoidal variation

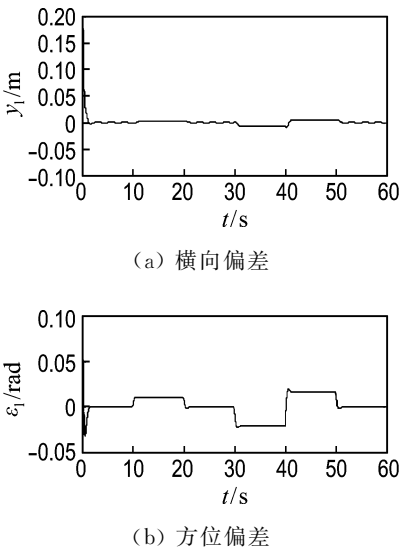


图 10 $v_x=10\text{ m/s}$ 时横向和方位偏差仿真结果

Fig. 10 Simulation results of lateral and direction errors when $v_x=10\text{ m/s}$

制算法仍然能够很好地跟踪参考路径,而且具有较快的收敛速度,曲线变化比较柔和,能够有效抑制抖振现象。

为了检验算法对于车辆在高速情况下的跟踪能力,将纵向车速提高至 $v_x=20\text{ m/s}$,此时的横向和方位偏差响应如图 11 所示,虽然开始时振动稍大,但是很快会趋于平稳,且横向偏差控制在 $\pm 0.08\text{ m}$,方位偏差控制在 $\pm 0.08\text{ rad}$,可以看出速度的增加在一定程度上对横向和方位偏差有影响,但是该控制算法都能保证跟踪的稳定性,不会出现抖振,曲线变化相对平滑柔和稳定。

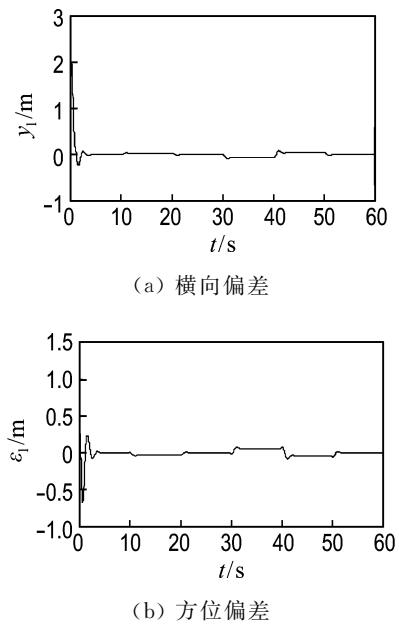


图 11 $v_x=20\text{ m/s}$ 时横向和方位偏差仿真结果

Fig. 11 Simulation results of lateral and direction errors when $v_x=20\text{ m/s}$

此外,还通过改变轮胎的侧偏刚度和预瞄距离以测试这两个参数的变化对车辆横向控制的影响,横向和方位偏差均稳定在一定数值范围内,没有出现抖振现象,这表明本文所提出的模糊滑模控制算法对车辆主要参数的变化均具有较强的鲁棒性,能够满足稳定且准确地跟踪参考路径的要求。

4.2 工况Ⅱ仿真分析

为了更好地检验所设计的模糊滑模横向控制算法在复杂路况下对车辆横向控制的效果,设计参考路径Ⅱ如图 12 所示,相比参考路径Ⅰ,路径

曲率变化得更快,车辆跟踪路径所处的工况环境更为恶劣. 仿真结果如图 13 和 14 所示,分别表示前轮转角、横向偏差和方位偏差响应曲线. 通过对仿真曲线的分析可以看出,虽然工况更为恶劣,但是前轮转角响应曲线变化平稳,没有出现抖振,保证了方向盘转动的稳定性,同时横向偏差和方位偏差都稳定在很小的范围内,分别为 $\pm 0.03\text{ m}$ 和 $\pm 0.07\text{ rad}$,说明所提出的控制算法能够准确、稳

定地跟踪复杂的参考路径,对车辆参数的变化具有较强的鲁棒性,满足智能车辆横向控制的要求.

5 结 语

本文针对基于视觉预瞄的车辆横向模型,研究并提出了模糊滑模横向控制算法,即由横向偏差和方位偏差融合的综合偏差来构成滑模面,采用滑模切换函数及其导数作为模糊控制的输入变量,不同于以往采用综合偏差作为模糊控制输入变量,这种改变能更好地克服参数不确定性及外界干扰的影响,并且削弱滑模控制所引起的抖振现象,确保了跟踪控制过程中车辆的方向盘转动的稳定性. 仿真结果表明该控制算法能够保证智能车辆稳定准确地跟踪参考路径,满足智能车辆自主导航对车辆横向控制的要求.

参考文献:

[1] Netto M, Blosseville J, Lenoit B. A new robust control system with optimized use of the lane detection data for vehicle full lateral control under strong curvature [C] // **IEEE Intelligent Transportation Systems Conference**. Piscataway: IEEE, 2006:1382-1387.

[2] 赵照俊,陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究[J]. 汽车工程, 2011, **33**(5):382-387.

ZHAO Xi-jun, CHEN Hui-yan. A study on lateral control method for the path tracking of intelligent vehicles [J]. **Automotive Engineering**, 2011, **33**(5): 382-387. (in Chinese)

[3] 马 莹,李克强,高 峰,等. 改进的有限时间最优预瞄横向控制器设计[J]. 汽车工程, 2006, **28**(5): 433-438.

MA Ying, LI Ke-qiang, GAO Feng, *et al.* Design of an improved optimal preview lateral controller [J]. **Automotive Engineering**, 2006, **28**(5): 433-438. (in Chinese)

[4] Tai M, Tomizuka M. Experimental study of lateral control of heavy vehicles for automated highway systems [C] // **Proceedings of the American Control Conference**. Anchorage: ACC, 2002:851-865.

[5] Trabia M B, Shi L Z, Hodge N E. A fuzzy logic

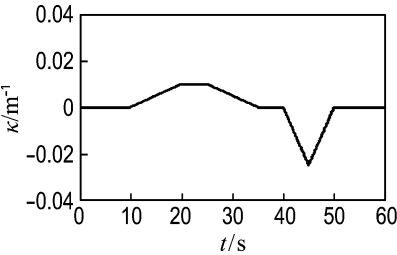


图 12 参考路径 II
Fig. 12 Reference path II

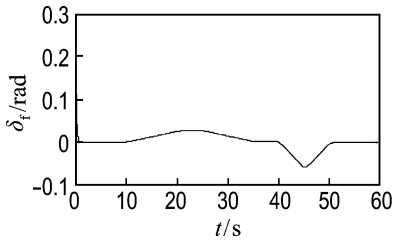
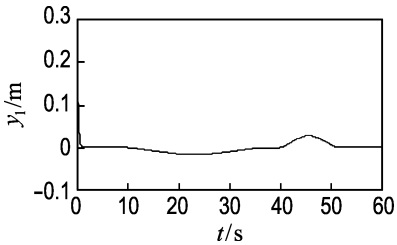
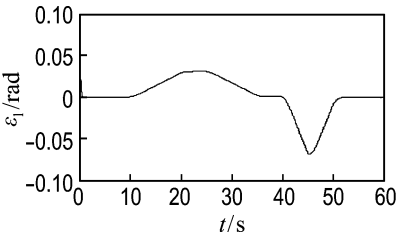


图 13 前轮转角
Fig. 13 Steering angle of front wheel



(a) 横向偏差



(b) 方位偏差

图 14 横向和方位偏差模拟结果

Fig. 14 Simulation results of lateral and direction errors

controller for autonomous wheeled vehicles [M/OL] // **Mobile Robots, Moving Intelligence**, 2006: 175-200. http://www.intechopen.com/books/mobile_robotics_moving_intelligence/a_fuzzy_logic_controller_for_autonomous_wheeled_vehicles.

[6] 马雷,王荣本. 智能车辆导航控制技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2004, **34**(4):582-586.

MA Lei, WANG Rong-ben. Intelligent vehicle steering control [J]. **Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition**, 2004, **34**(4): 582-586. (in Chinese)

[7] Kosecka J, Blasi R, Taylor C J, *et al.* A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving [C] // **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Piscataway:IEEE, 1998: 1903-1908.

[8] 曾光奇,胡均安,王东,等. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2006.

ZENG Guang-qi, HU Jun-an, WANG Dong, *et al.* **Fuzzy Control Theory and Engineering Application** [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2006. (in Chinese)

[9] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 吉林:吉林科学技术出版社, 1991.

GUO Kong-hui. **Dynamics of Controllability Automobile** [M]. Jilin:Jilin Science and Technology Publishing House, 1991. (in Chinese)

Fuzzy sliding mode lateral control of intelligent vehicle based on vision

LI Lin-hui^{1,2}, LI Ming^{1,2}, GUO Jing-hua^{1,2}, LIAN Jing^{*1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Automotive Engineering, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Lateral control of intelligent vehicle is investigated taking the intelligent vehicle DLUIV-1 based on visual navigation as the control object. Firstly, the system model of vehicle lateral control based on visual preview distance is established. The lateral error and direction error are calculated making use of the model of vehicle preview kinematics containing speed and other factors. Secondly, an efficient strategy of fuzzy sliding mode lateral control for intelligent vehicle is proposed according to the characteristics of lateral control. The integration of the vehicle current lateral error and direction error is chosen as the parameter of the sliding mode switching function to design the sliding surface. The value of the control variable is adjusted according to the fuzzy control rules to ensure that it meets the existence and reaching condition taking sliding mode switching function as the control target, and ensure the stability of the steering wheel rotation. Simulation results show that the lateral controller can guarantee high path-tracking accuracy and strong robustness for the change of model parameters.

Key words: intelligent vehicle; lateral control; fuzzy control; sliding mode control