

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.09.014

智能车辆轨迹跟踪控制方法研究

唐传茵<sup>1</sup>, 赵懿峰<sup>2</sup>, 赵亚峰<sup>1</sup>, 周淑文<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 上海赛科利汽车模具技术应用有限公司, 上海 201209)

**摘 要:** 针对智能车辆的轨迹跟踪控制问题,提出了一种可以调节参数的智能车辆轨迹跟踪控制方法。首先,设计了模糊控制器对智能车辆进行路径跟踪控制;其次,为了提高车辆在高速下的路径跟踪效果,设计模型预测控制器,并结合轮胎的动力学特性及车辆动态特性对轮胎侧偏角、质心侧偏角等进行约束;然后,为了提高车辆在不同工况下的路径跟踪效果,进一步设计了基于 PSO 算法的模型预测控制器。比较三种控制器的控制效果,选择典型工况在联合仿真平台上进行仿真。结果表明,提出的智能车辆的轨迹跟踪控制方法可以有效地对车辆轨迹进行跟踪。

**关 键 词:** 智能车辆;轨迹跟踪;模型预测控制;模糊控制;粒子群优化(PSO)

**中图分类号:** U 471.15      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)09-1297-07

Research on the Trajectory Tracking Control Method of Intelligent Vehicles

TANG Chuan-yin<sup>1</sup>, ZHAO Yi-feng<sup>2</sup>, ZHAO Ya-feng<sup>1</sup>, ZHOU Shu-wen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. Shanghai Superior Die Technology Co., Ltd., Shanghai 201209, China. Corresponding author: TANG Chuan-yin, E-mail: monsigor@aliyun.com)

**Abstract:** Aiming at the trajectory tracking control problem of intelligent vehicles, the trajectory tracking control method with adjustable parameters of intelligent vehicles was presented. Firstly, the fuzzy controller was designed to track intelligent vehicles. Secondly, in order to improve the path tracking effect of vehicles at high speeds, the model prediction controller was further designed, and the tire side deviation angle and centroid side deviation angle were restrained by combining the dynamic characteristics of tires and vehicles. Then, in order to improve the path tracking effect of vehicles under different working conditions, a model prediction controller based on PSO algorithm was further designed. The control effects with different methods were compared. Finally, the typical working conditions were selected for simulation on the joint simulation platform. The results showed that the proposed trajectory tracking control method of intelligent vehicles can effectively track the vehicle trajectory.

**Key words:** intelligent vehicle; trajectory tracking; model predictive control; fuzzy control; particle swarm optimization (PSO)

智能化汽车的概念逐渐被越来越多的人所熟知,与之相关的技术也开始普遍应用。智能车辆可以自动完成一些基本的驾驶操作行为,从而可以避免人为因素引起的交通事故,不仅交通事故率可以降低,而且道路拥堵问题也能得到有效缓解。智能车辆的研究领域非常广阔,是一个由计算机技术、人工智能、控制工程、电子通信等多个学科

和前沿技术所组成的综合体。轨迹跟踪控制技术作为智能车辆的关键技术之一,通过控制智能车辆的驱动系统与制动系统,使车辆按照规划好的路径行驶,并且保证乘客的舒适性和车辆的稳定性。

国内外的许多高校和科研院所采用不同的控制方法对轨迹跟踪控制进行了研究<sup>[1-6]</sup>。车辆系统具有多变量的特点,系统的动态特征难以用传

统的控制方法进行描述,学者们用模糊控制方法来控制智能车辆的轨迹跟踪问题<sup>[7]</sup>.模糊控制算法在高速下的路径跟踪效果稍差.为了提高路径跟踪效果和便于处理约束问题,模型预测控制越来越受到人们的重视.文献[8]设计了基于车辆运动学模型的预测控制算法,该算法通过建立基于横向位置与航向角偏差的反馈模糊控制器对路径进行跟踪,但该方法在高速工况下误差偏大.对于模型预测控制算法来说,选择合适的预测时域与控制时域是很重要的.通常这两个控制参数主要依靠经验进行人工调整选择,这样做不仅费时费力,而且不一定能保证模型预测控制器的路径跟踪效果最优.

本文针对提高智能车辆不同工况和不同速度下的路径跟踪效果,研究了模糊控制器、模型预测控制器在智能车辆的轨迹跟踪控制中的作用.并且在此基础上,利用 PSO 算法研究了预测时域与控制时域在模型预测控制器中的参数优化问题,分析了预测输出及控制输入步长对系统动态优化结果的影响.提出了一种可以调节参数的智能车辆轨迹跟踪控制方法,并进行了相应的理论分析与仿真实验工作.

1 车辆动力学模型

建立如图 1 所示的车辆四轮简化动力学模型.其中 XOY 为大地参考坐标系, xoy 为车体参考坐标系. *a* 为质心到前轴的距离, *b* 为质心到后轴的距离, *c* 为前后轮半轮距,  $\omega$  为横摆角速度,  $\beta$  为质心侧偏角,  $\alpha$  为轮胎侧偏角, *V* 为车辆的行驶速度, *u* 为纵向车速, *v* 为侧向车速. *F*<sub>cf1</sub>, *F*<sub>cf2</sub> 为前轮左右两个轮胎所受的侧偏力, *F*<sub>cr1</sub>, *F*<sub>cr2</sub> 为后轮左右

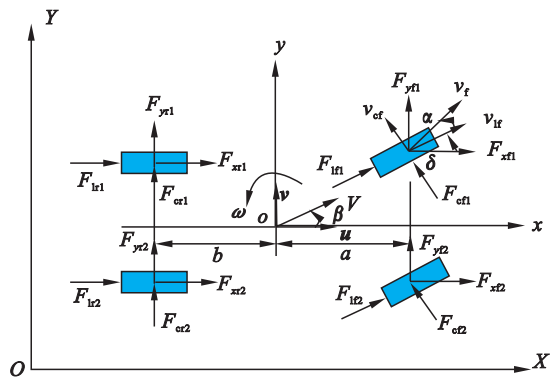


图 1 车辆动力学模型  
Fig. 1 Vehicle dynamics model

两个轮胎所受的侧偏力; *F*<sub>lf1</sub>, *F*<sub>lf2</sub> 为前轮左右两个轮胎所受的纵向力, *F*<sub>lr1</sub>, *F*<sub>lr2</sub> 为后轮左右两个轮胎所受

的纵向力; *F*<sub>xf1</sub>, *F*<sub>xf2</sub> 为前轮左右两个轮胎所受的 *x* 方向力, *F*<sub>xl1</sub>, *F*<sub>xl2</sub> 为后轮左右两个轮胎所受的 *x* 方向力; *F*<sub>yf1</sub>, *F*<sub>yf2</sub> 为前轮左右两个轮胎所受的 *y* 方向力, *F*<sub>yl1</sub>, *F*<sub>yl2</sub> 为后轮左右两个轮胎所受的 *y* 方向力.

车辆动力学的非线性模型为

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= m\dot{y}\omega + 2\left[c_f s_f + k_1\left(\frac{v+a\omega}{u} - \delta\right)\delta + c_r s_r\right], \\ m\ddot{y} &= -m\dot{x}\omega + 2\left[k_1\left(\delta - \frac{v+a\omega}{u}\right) + k_2\frac{b\omega - v}{u}\right], \\ I_z\dot{\omega} &= 2\left[ak_1\left(\delta - \frac{v+a\omega}{u}\right) - bk_2\frac{b\omega - v}{u}\right], \\ \dot{X} &= u\sin\varphi + v\cos\varphi, \\ \dot{Y} &= u\cos\varphi - v\sin\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: *X*, *Y* 表示车辆以大地坐标系作为参考系的坐标;  $\varphi$  为车辆的航向角;  $\alpha$  为轮胎的侧偏角; *c*<sub>f</sub> 为前轮纵向刚度; *c*<sub>r</sub> 为后轮纵向刚度; *s*<sub>f</sub> 为前轮滑移率; *s*<sub>r</sub> 为后轮滑移率;  $\delta$  为前轮转角.

将式(1)表示成状态方程的形式,

$$\dot{\xi} = f(\xi, u). \quad (2)$$

式中: 状态变量  $\xi = [\dot{x} \ \dot{y} \ \varphi \ \dot{\varphi} \ X \ Y]$ ;  
输入变量 *u* =  $\delta$ .

2 智能车辆模糊控制器

2.1 模糊控制

设计模糊控制器,以横向偏差和航向偏差作为控制器的输入量,前轮转角作为控制器的输出量;对车辆在高、中、低三种不同速度下的路径跟踪能力进行仿真验证.工况选择双移线工况和换道工况.规定车辆位于道路中心线右侧时,横向偏差为正,反之为负;航向偏差顺时针为正,逆时针为负;前轮转角右转为正,左转为负.依据上述原则和人工经验,并结合实际的仿真效果不断进行调整,最终确定的模糊控制规则表如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则表  
Table 1 Regulation table of fuzzy control

横向 偏差	航向偏差						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	PS
NM	PB	PB	PM	PM	PM	ZO	NS
NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NM	NM
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	PS	ZO	NM	NM	NB	NB	NB
PB	NS	NM	NB	NB	NS	NB	NB

注: NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大.

2.2 仿真分析

不同速度下双移线工况与换道工况的仿真结果如图2和图3所示。

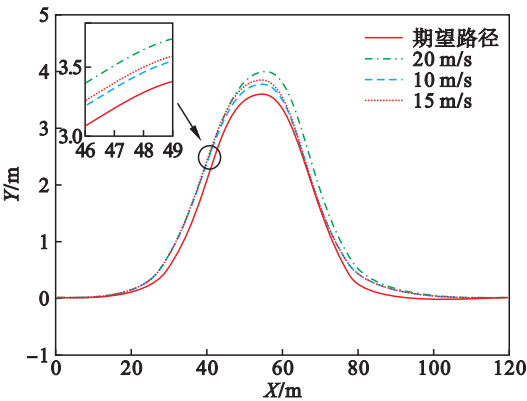


图2 不同速度下的双移线行驶路径对比  
Fig. 2 Comparison of driving paths on double lane change at different speeds

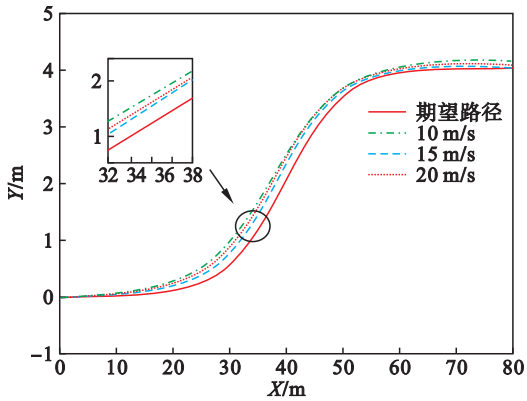


图3 不同速度下的换道行驶路径对比  
Fig. 3 Comparison of driving paths on lane chang at different speeds

从图2与图3可以看出,当车辆以高、中、低三种速度对路径进行跟踪时,随着速度的增加横向偏差逐渐增大,最大偏差出现在弯道处。当车辆以中低速度行驶时,在模糊控制器的作用下可以较好地完成对目标路径的跟踪,具有较高的跟踪精度;当车辆以较高速度行驶时,横向偏差明显增大,导致路径跟踪效果稍差。

3 智能车辆模型预测控制器

假设参考车辆能够完全通过参考轨迹,并且满足建立的动力学模型,由此可以得到每个时刻所需的 $\xi_m$ 与控制量 $u_m$ ,且满足如下关系:

$$\dot{\xi}_m=f(\xi_m,u_m).$$

其中: $\xi_m=[\dot{x}_m \quad \dot{y}_m \quad \varphi_m \quad \dot{\varphi}_m \quad X_m \quad Y_m]^T$ ;

$$u_m=\delta_m.$$

式中, $\dot{x},\dot{y},\varphi$ 是当前时刻的状态变量,  $(\xi_m,u_m)$ 为

某一参考点。

为了保证车辆具有良好的行驶稳定性,对控制量和控制增量及车辆的动力学参数进行约束。分别对前轮转角及其增量、轮胎侧偏角、质心侧偏角、地面附着条件这4个量进行约束。

1) 控制量及其增量约束. 约束设置为

$$\begin{aligned} -10^{\circ} \leq \delta \leq 10^{\circ}, \\ -0.8^{\circ} \leq \Delta \delta \leq 0.8^{\circ}. \end{aligned}$$

2) 轮胎侧偏角约束. 约束设置为

$$-3^{\circ} \leq \alpha \leq 3^{\circ}.$$

3) 质心侧偏角约束. 约束设置为

$$\begin{aligned} -12^{\circ} \leq \beta \leq 12^{\circ}, (\text{高附着路面}); \\ -2^{\circ} \leq \beta \leq 2^{\circ}, (\text{低附着路面}). \end{aligned}$$

4) 路面附着条件约束. 对目标函数和约束条件进行综合,同时参考文献[9],采用如下控制目标作为模型预测控制器的目标函数:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U} \sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i)-y_m(k+i)\|_Q^2 + \\ \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2. \\ u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \\ \Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}, \\ \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \\ \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max}, \\ a_{y\min} \leq a_y \leq a_{y\max}. \end{aligned}$$

在每个周期内系统对上述优化问题进行求解得到控制时域内控制增量序列,最优控制序列如下:

$$\Delta U_k^*=[\Delta u_k^*,\Delta u_{k+1}^*,\cdots,\Delta u_{k+N_c-1}^*].$$

4 模型预测控制器仿真分析

分析双移线工况与换道工况下的控制器仿真效果,选择高、中、低三种车速进行仿真验证。设置速度 $v$ 分别为10,15,20 m/s,路面附着系数 $\mu=0.8$ 。

为了验证模型预测控制器对速度的鲁棒性,分析车辆以不同速度行驶时的控制效果,将不同速度下的仿真结果进行对比。图4~图6包括两种工况,双移线工况和换道工况。图4为两种工况下,车辆实际行驶轨迹与参考轨迹的对比图,其中图4a为双移线工况,图4b为换道工况,图中横轴表示纵向位移。图5为两种工况下,前轮转角对比图;图6为两种工况下,轮胎侧偏角随时间变化的曲线图。图5,图6中低速、中速、较高车速分别用实线、虚线、点划线表示,横轴为时间。

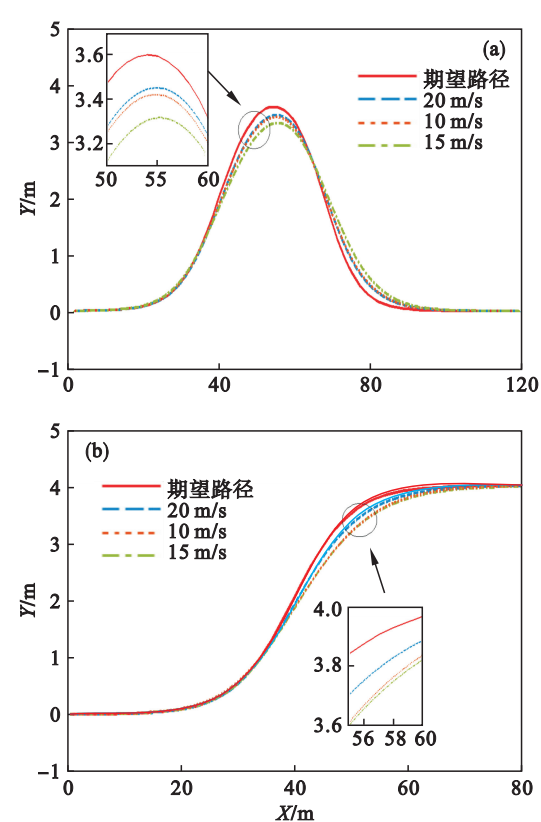


图 4 不同车速下行驶轨迹对比  
Fig. 4 Driving trajectory comparison at different speeds  
(a)—双移线工况; (b)—换道工况.

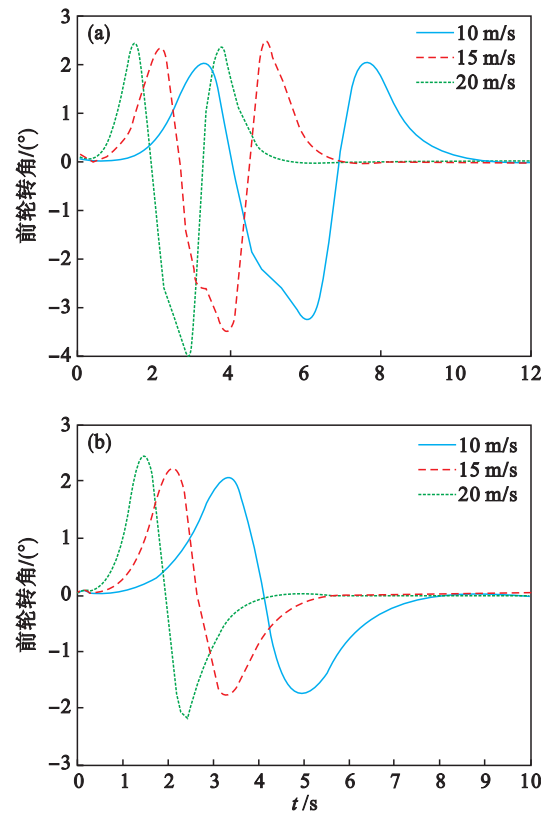


图 5 不同车速下前轮转角对比  
Fig. 5 Comparison of front wheel angle at different speeds  
(a)—双移线工况; (b)—换道工况.

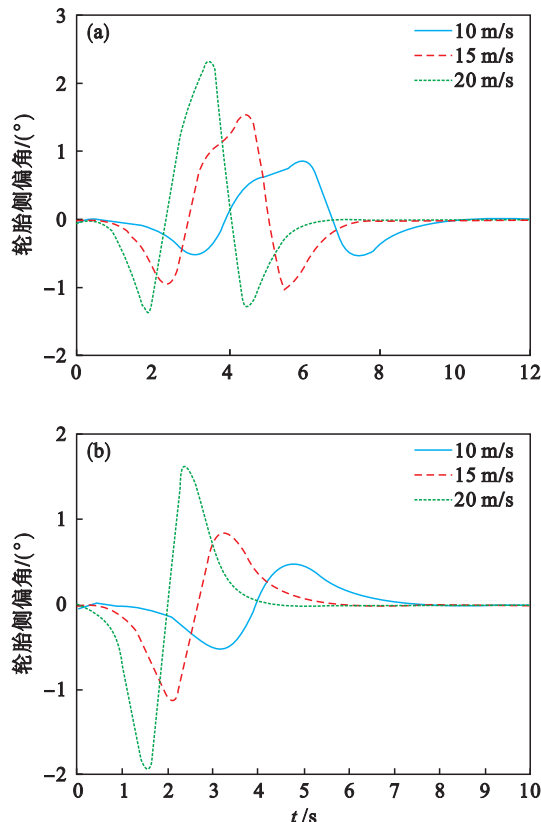


图 6 轮胎侧偏角对比  
Fig. 6 Comparison of slip angle at different speeds  
(a)—双移线工况; (b)—换道工况.

由图 4 可知,在模型预测控制器的作用下,车辆在中、低速度下能对目标路径进行较好地跟踪,仅在弯道部分车辆的实际行驶轨迹与参考轨迹存在偏差;当车辆以较高的车速行驶时,横向偏差有所增大,但在模型预测控制器的作用下最终将偏差收敛为 0,说明车辆在不同速度下都具有较好的跟踪效果. 由图 5 可知,随着车速的增加,前轮转角变化的位置也向前移动,并且变化的范围也逐渐增大,总体变化范围为  $-4^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$ ,始终处在约束范围内,并且变化平稳,没有明显的抖动,可以确保被执行机构顺利执行. 从图 6 可看出,轮胎侧偏角随着车速的增加逐渐增大,总体的变化范围为  $-1.4^{\circ} \sim 2.4^{\circ}$ ,始终处在约束范围,保证了车辆在轨迹跟踪过程中具有较好的侧向稳定性.

## 5 基于 PSO 优化算法的模型预测控制器

搭建 Carsim 与 Simulink 联合仿真平台. 利用 PSO 算法对不同速度下模型预测控制器的控制参数预测时域和控制时域进行优化. PSO 算法和联合仿真平台之间通过粒子 (MPC 中的参数  $N_p$ ,

$N_c$ ) 和该粒子所对应的适应度值 (控制系统的性能指标) 建立联系.

5. 1 参数优化分析

5. 1. 1 双移线工况

利用 PSO 算法对双移线工况下不同速度的模

型预测控制器中的控制参数进行优化, 优化后的结果如图 7 所示. 其中, 图 7a, 图 7b 分别为车速为低速时的性能指标 IAE 与预测时域  $N_p$ 、控制时域  $N_c$  的变化曲线. 图 7c ~ 图 7f 分别为车速为中速、高速时的性能指标 IAE 与参数值  $N_p, N_c$  的变化曲线.

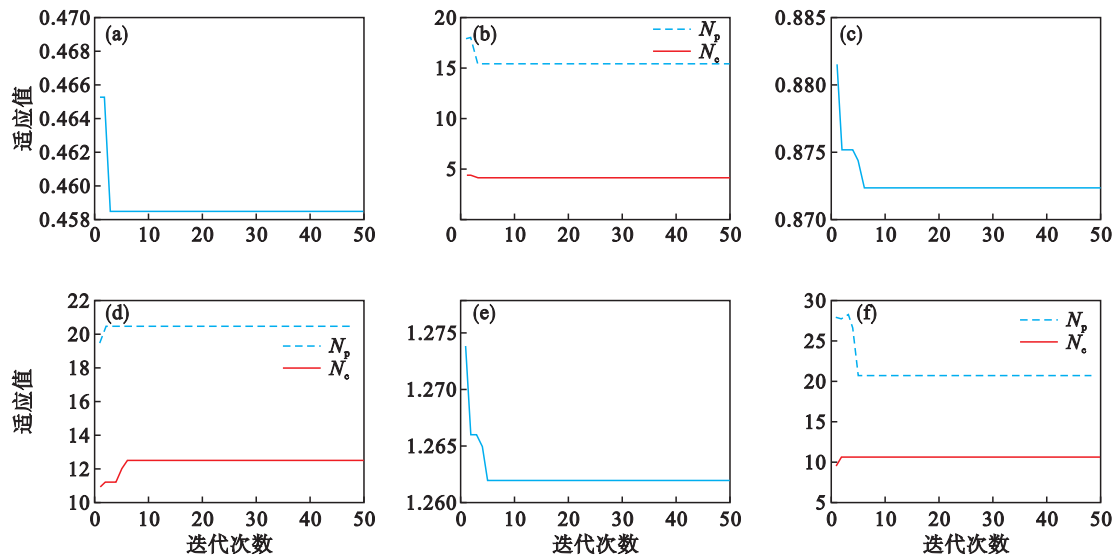


图 7 双移线工况下不同速度的最优适应值及控制参数的变化曲线

Fig. 7 Optimal value and control parameters at different speeds under condition of double lane change

(a)—低速, IAE; (b)—低速,  $N_p, N_c$ ; (c)—中速, IAE; (d)—中速,  $N_p, N_c$ ; (e)—高速, IAE; (e)—高速,  $N_p, N_c$ .

从图 7 可以看出, 低速时的性能指标 IAE 的变化曲线经过 3 次迭代趋于稳定, 并达到最小值, 最小值为 0. 458 5; 参数  $N_p$  的最优值为 15. 395 3, 参数  $N_c$  的最优值为 4. 234 9. 中速时的性能指标 IAE 的变化曲线经过 6 次迭代趋于稳定, 并达到最小值, 最小值为 0. 872 4; 参数  $N_p$  的最优值为 20. 523 7, 参数  $N_c$  的最优值为 12. 534 6. 高速时的

性能指标 IAE 的变化曲线经过 5 次迭代趋于稳定, 并达到最小值, 最小值为 1. 262; 参数  $N_p$  的最优值为 20. 923 8, 参数  $N_c$  的最优值为 10. 693 5.

5. 1. 2 换道工况

进行换道工况参数优化分析, 结果如图 8 所示. 图 8a ~ 图 8f 分别为换道工况下车速为低速、中速、高速时的性能指标 IAE 与参数值  $N_p, N_c$  的变化曲线.

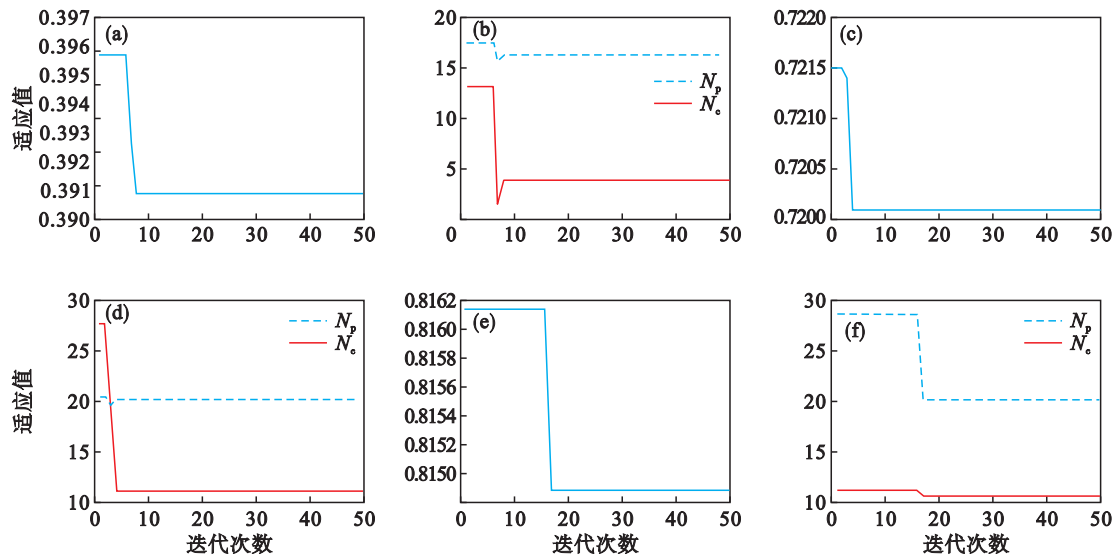


图 8 换道工况下不同速度的最优适应值及控制参数的变化曲线

Fig. 8 Optimal value and control parameters at different speeds under condition of lane change

(a)—低速, IAE; (b)—低速,  $N_p, N_c$ ; (c)—中速, IAE; (d)—中速,  $N_p, N_c$ ; (e)—高速, IAE; (f)—高速,  $N_p, N_c$ .



5.2 仿真验证

为了比较控制器的控制效果,选择双移线工况与换道工况在不同速度下进行对比分析. 图 9 ~ 图 14 分别为车辆以低速、中速、较高车速行驶时,三种控制器的轨迹跟踪效果. 针对不同的工况和不同的车速,将模糊控制器、模型预测控制器以及基于 PSO 优化模型预测控制器的实际行驶路径进行对比.

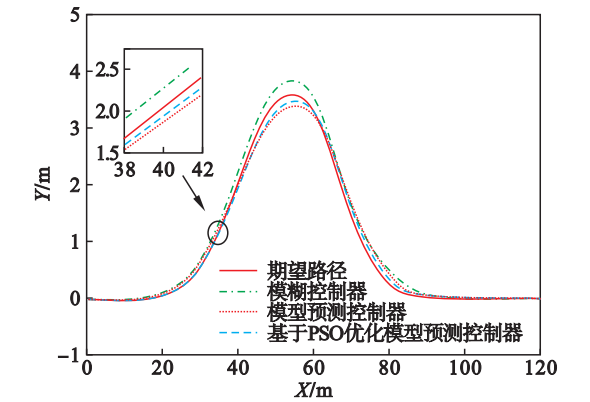


图 9 双移线工况下低速时不同控制器行驶轨迹对比  
Fig. 9 Comparison of driving trajectories of different controllers at low speed on double lane change

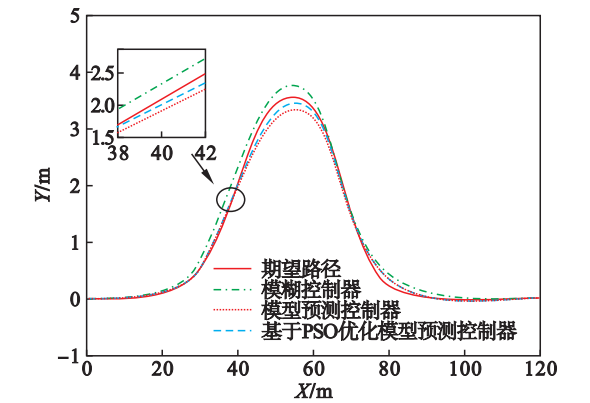


图 10 双移线工况下中速时不同控制器行驶轨迹对比  
Fig. 10 Comparison of driving trajectories of different controllers at medium speed on double lane change

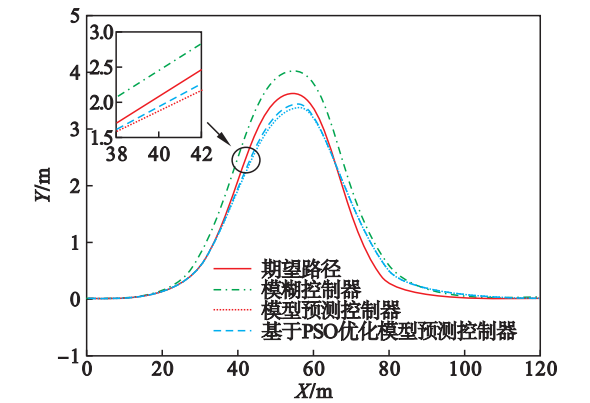


图 11 双移线工况下较高车速时不同控制器行驶轨迹对比  
Fig. 11 Comparison of driving trajectories of different controllers at high speed on double lane change

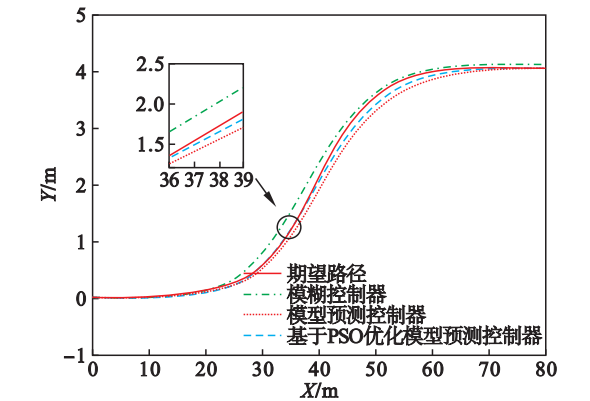


图 12 换道工况下低速时不同控制器行驶轨迹对比  
Fig. 12 Comparison of driving trajectories of different controllers at low speed on lane change

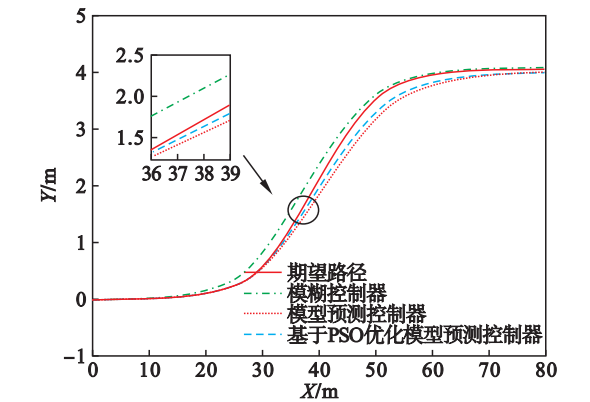


图 13 换道工况下中速时不同控制器行驶轨迹对比  
Fig. 13 Comparison of driving trajectories of different controllers at medium speed on lane change

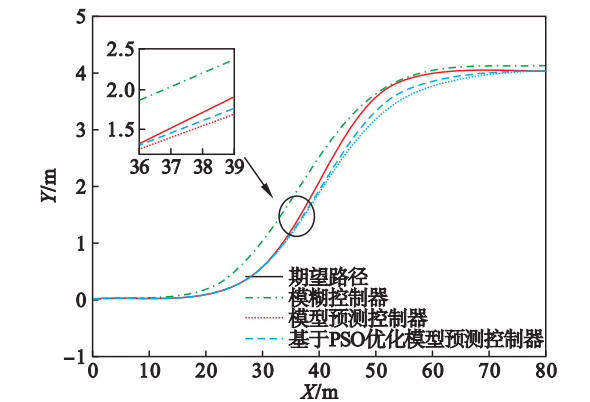


图 14 换道工况下较高车速时不同控制器行驶轨迹对比  
Fig. 14 Comparison of driving trajectories of different controllers at high speed on lane change

从图 9 ~ 图 14 可以看出,在  $v = 10 \text{ m/s}$  时这三种控制器都能对期望路径进行比较好地跟踪,且跟踪精度较高. 相较于其他两种控制器,模糊控制器的跟踪误差稍大,其最大横向偏差出现在弯道处;当采用模型预测控制器时,横向偏差有所减小,路径跟踪效果有所提高;而基于 PSO 优化的模型预测控制器的跟踪误差进一步缩小,路径跟踪效果进一步提高.

## 6 结 论

- 1) 设计了模糊控制器与线性时变模型预测控制器.
- 2) 采用 PSO 算法对模型预测控制器中的预测时域与控制时域进行优化,得到了不同速度和不同工况下的最优控制参数.将模糊控制器、模型预测控制器以及基于 PSO 优化的模型预测控制器的控制效果进行对比.结果表明,中低车速时这三种控制器都具有较好的路径跟踪效果;车速较高时,相较于模糊控制器,模型预测控制器的跟踪误差更小、跟踪效果更好,而基于 PSO 优化的模型预测控制器的路径跟踪效果进一步提高.

### 参考文献：

[ 1 ] Alcalá E, Puig V, Quevedo J. LPV-MPC control for autonomous vehicles [ J ]. *IFAC-Papers Online*, 2019, 52 ( 28 ) :106 – 113.

[ 2 ] Latham A, Nattrass M. Autonomous vehicles, car-dominated environments, and cycling: using an ethnography of infrastructure to reflect on the prospects of a new transportation technology [ J ]. *Journal of Transport Geography*, 2019, 81 ( 102539 ) :1 – 8

[ 3 ] Min H G, Wu X, Cheng C Y, et al. Kinematic and dynamic vehicle model-assisted global positioning method for

autonomous vehicles with low-cost GPS/Camera/In-vehicle sensors [ J ]. *Sensors*, 2019, 19 ( 5430 ) :1 – 24

[ 4 ] Kuhne F, Lages W F, João L, et al. Model predictive control of a mobile robot using linearization [ J ]. *Proceedings of Mechatronics and Robotics*, 2004 ( 4 ) :525 – 530.

[ 5 ] Levinson J, Askeland J, Becker J, et al. Towards fully autonomous driving: systems and algorithms [ C ]//2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium ( IV ). Spain: IEEE, 2011 :163 – 168.

[ 6 ] Yoon Y, Shin J, Kim H J, et al. Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous ground vehicles[ J ]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17 ( 7 ) : 741 – 750.

[ 7 ] 黄颖涛,徐筠凯. 基于模糊控制的自动驾驶车辆轨迹跟踪控制研究[ J ]. 装备制造技术, 2018 ( 9 ) :82 – 83, 105.  
( Huang Ying-tao, Xu Yun-kai. Research on trajectory tracking control of automatic driving vehicle based on fuzzy control[ J ]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018 ( 9 ) : 82 – 83, 105. )

[ 8 ] 尹晓丽,李雷,贾新春. 无人驾驶汽车路径跟踪模糊预测控制[ J ]. 中北大学学报 ( 自然科学版 ), 2011, 32 ( 2 ) :135 – 138.  
( Yin Xiao-li, Li Lei, Jia Xin-chun. Fuzzy predictive control for path tracking of driverless cars [ J ]. *Journal of North University of China ( Natural Science Edition )*, 2011, 32 ( 2 ) : 135 – 138. )

[ 9 ] 龚建伟,姜岩,徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[ M ]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.  
( Gong Jian-wei, Jiang Yan, Xu Wei. Predictive control of unmanned vehicle model [ M ]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014. )