

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902326

# 智能车运动轨迹跟踪算法的研究\*

储开斌 郭俊俊

(常州大学 信息科学与工程学院 数理学院 常州 213164)

**摘要:**针对智能车运动过程中轨迹跟踪精度差的问题,提出了一种基于反演控制算法的智能车运动轨迹跟踪算法。首先,建立智能车的运动学模型、误差模型和动态模型。然后,根据反演控制算法,设计出合理分部虚拟控制量,并结合李雅普诺夫稳定性分析,设计智能车运动轨迹跟踪控制律;最后,在 Simulink 上进行智能车运动轨迹跟踪控制的仿真实验。实验结果表明,设计的智能车运动轨迹跟踪算法相比于迭代学习算法或者李雅普诺夫直接法,具有更好的实时性且跟踪精度好,且满足不同车速环境下智能车稳定性的需求。

**关键词:**智能车;轨迹跟踪;反演控制算法;分部虚拟控制量

**中图分类号:** TP393;TN401 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8080

## Tracking algorithm of intelligent vehicle movement trajectory

Chu Kaibing Guo Junjun

(College of Mathematics and Physics, College of Information Science and Engineering,  
University of Changzhou, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Aim at the difference in trajectory tracking accuracy during the movement of smart cars. An intelligent vehicle trajectory tracking algorithm based on inversion control algorithm is proposed. First, establish the kinematics model of the smart car, error model and dynamic model. Then, according to the inversion algorithm, design a reasonable amount of virtual control of the branch, combined with Lyapunov stability analysis, the intelligent vehicle trajectory tracking control law is designed. Finally, the simulation experiment of intelligent vehicle trajectory tracking control is carried out on Simulink. The experimental results show that the designed smart car motion trajectory tracking algorithm has better real-time performance and better tracking accuracy in the above learning algorithm or Lyapunov direct method. And meet the needs of the stability of smart cars under different speed environments.

**Keywords:** smart car; trajectory tracking; inversion control algorithm; segmental virtual control

## 0 引言

智能车是一类重要的自动导引车辆,在物流运输、汽车制造、景区导航、机械搬运等行业中具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。如何提高智能车的智能化水平,特别是要能够根据给定的任务和路线要求,自主安全地驶向指定的目标,同时选择最合适的速度并最小化跟踪误差,具有重要的理论意义和应用价值<sup>[4-5]</sup>。

通常用于减少跟踪误差的一种技术被称为“look-

ahead”方法。该技术将智能车的期望轨迹投射到智能车预定运动方向。当智能车离开预定路径时,控制策略以合理的方式对智能车的运动轨迹进行调整。相反,如果智能车运行符合期望轨迹,则控制智能车以更加平滑的方式运行<sup>[6]</sup>。目前在智能车轨迹跟踪领域,轨迹跟踪控制技术一直受到国内外学者的关注,国内外学者对此提出了多种控制算法。其中最常见的是PID<sup>[7]</sup>、模糊控制<sup>[8]</sup>、自适应控制<sup>[9]</sup>等。在智能车跟踪控制方面,Hung等<sup>[10]</sup>使用自适应滑模控制系统用在全向移动小车上跟踪目标轨迹。Aslam等<sup>[11]</sup>使用模糊

收稿日期: 2019-06-24 Received Date: 2019-06-24

\* 基金项目:江苏省重大成果转化项目(BA2017012)、常州大学科技项目(ZMF18020066)资助

滑模控制对滑移转向车辆进行轨迹跟踪控制。裴九芳等<sup>[12]</sup>使用迭代学习控制来对移动机器人轨迹进行控制跟踪。随着智能控制理论的发展,智能车辆轨迹跟踪控制方面出现了许多新的控制算法。李兵等<sup>[13]</sup>为了或得更好的控制轨迹,利用滑模算法和 RBF 神经网络算法设计车辆的路径跟踪控制器。文献[14]结合李雅普诺夫直接算法设计了车辆轨迹跟踪控制器。然而在实际应用中上述算法仍存在限制:模型预测算法和迭代控制算法在控制精度上有较高的准确性但耗时过长,不能满足控制系统实时性的要求;神经网络算法则需要大量的数据集进行训练,成本较高。

为提高智能车在实时运动过程中的轨迹跟踪精度,提出了一种结合李雅普诺夫稳定性分析的反演控制算法,对智能车的轨迹跟踪系统进行了优化设计。为提高智能车运行的实时性,在反演控制算法的基础上,设计出合理的分部虚拟控制量,并采用李雅普诺夫收敛定理对设计的控制系统进行合理性分析,根据分析结果得到了一套简单的控制律。

## 1 车辆模型

### 1.1 运动学模型

智能车的运动是一个复杂的过程,本文假设智能车的惯性忽略不计,忽略智能车在行驶过程中的侧向力以及车轮在运动过程中的侧向滑动<sup>[15-16]</sup>。图 1 所示为智能车简化的运动学模型,其中子指数( $a, b, c$ )分别代表 3 个跟踪点,后轴中点、车辆中心和前轴中点。

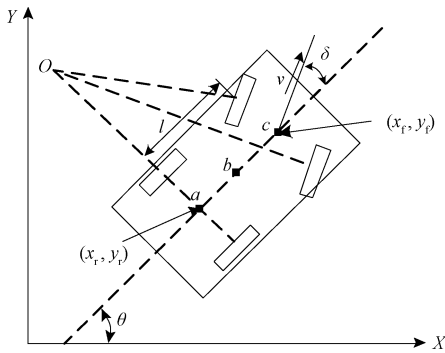


图 1 智能车运动学模型

Fig. 1 Smart car kinematics model

$v$  是车辆前轴中心点的速度,  $\theta$  是车辆的航向角,  $l$  是轴间距离,  $\delta$  是前轮转角。由图 1 的运动学模型可以得到智能车连续的运动学方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v(t) \cdot \cos\theta_i(t) \\ \dot{y}_i(t) = v(t) \cdot \sin\theta_i(t) \\ \begin{cases} \dot{\theta}_a(t) = \frac{v}{l} \cdot \tan\delta(t) \\ \dot{\theta}_b(t) = \frac{v}{l \sqrt{\arctan\delta + 0.25}} \\ \dot{\theta}_c(t) = \frac{v}{l} \cdot \tan\delta(t) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_i$  和  $y_i$  是第  $i$  个跟踪点的笛卡尔坐标 ( $i = a, b, c$ ), 尽管可以从任何跟踪点的角度计算轨迹跟踪误差,但目标始终是设计一个能够操纵  $v_c$  和  $\delta_c$  的稳定控制器,而子索引  $c$  是车辆系统输入和输出控制器,因此本文将智能车后轴中点定为参考点,为了将表达方式简化,令:

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t) = \frac{v}{l} \cdot \tan\delta(t) \quad (2)$$

则车辆的运动学方程可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cdot \cos\theta(t) \\ \dot{y}(t) = v(t) \cdot \sin\theta(t) \\ \dot{\theta}(t) = \omega(t) \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 误差分析

如图 2 所示,其中  $(x_d; y_d; \theta_d)$  表示智能车的期望位置,  $(x_r; y_r; \theta_r)$  表示实际的智能车姿态。智能车的位姿误差是:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_d & \sin\theta_d & 0 \\ -\sin\theta_d & \cos\theta_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d - x_r \\ y_d - y_r \\ \theta_d - \theta_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

结合式(3)对式(4)进行微分,可以得出智能车运行误差的微分方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_e(t) = y_e(t)\omega(t) - v_d(t) + v_r \cos\theta_e(t) \\ \dot{y}_e(t) = -x_e(t)\omega(t) + v_r \sin\theta_e(t) \\ \dot{\theta}_e(t) = \omega_d(t) - \omega_r(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $v_d$  是智能车当前速度。智能车轨迹跟踪控制的目标就是设计一个能够操纵  $v_c$  和  $\delta_c$  的稳定控制器,使智能车在任意的初始误差情况下控制  $v_c$  和  $\delta_c$ , 使智能车的  $(x_e, y_e, \theta_e)$  趋向于 0。

### 1.3 动态模型

为了模拟轨迹跟踪问题,本文建立智能车的非线性动态模型,考虑了轮胎打滑和空气阻力的影响<sup>[17-18]</sup>。车辆动态模型如图 4 所示。智能车动态模型为:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \end{pmatrix} = v \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi - \beta) \\ \sin(\psi - \beta) \end{pmatrix} \quad (6)$$

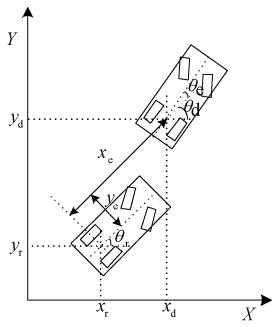


图2 智能车位姿  
Fig.2 Smart car posture

其中,  $\beta$  是智能车中心点处的航向角;  $\psi$  为智能车横摆角度。智能车各角度加速度为:

$$\begin{cases} \ddot{\beta} = \dot{\psi} - \frac{1}{M \cdot v} \left[ \left( \frac{F_x}{2} - F_a \right) \sin(\beta) + \frac{F_x}{2} \sin(\delta + \beta) + F_{yf} \cos \delta + \beta + F_{yr} \cos(\beta) \right] \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{I_{zz}} (F_{yf} \cdot l_f \cos(\delta) - F_{yr} \cdot l_r) \\ \dot{v} = \frac{1}{M} \left( \frac{F_x}{2} (\cos(\beta) + \cos(\delta + \beta)) - F_a \cos(\beta) - F_{yf} \sin(\delta + \beta) - F_{yr} \sin(\beta) \right) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $F_{yf}$  为前轮的纵向和切向力;  $F_{yr}$  后轮的纵向和切向力;  $F_x$  为智能车产生的总牵引力;  $F_a$  为空气阻力,  $M$  为智能车整车质量;  $I_{zz}$  为转动惯量。智能车的受力方程是:

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \left( \beta - \frac{l_f}{v} \dot{\psi} + \delta \right) \\ F_{yr} = C_r \left( \beta + \frac{l_r}{v} \dot{\psi} \right) \\ F_a = \frac{\xi \cdot \rho \cdot A}{2} v^2 \end{cases} \quad (8)$$

其中  $l_f$  为中心和前轴中点之间的距离,  $l_r$  为中心和后轴中点之间的距离,  $C_f$  为前轮胎刚度  $C_r$  为后轮胎刚度。  $\xi$  为空气阻力系数,  $\rho$  为空气密度,  $A$  为智能车迎风面积。

## 2 控制策略

### 2.1 算法流程

通过路径识别系统,得到了智能车的运动轨迹,为了减小轨迹跟踪的误差,采用反演控制算法并结合李雅普诺夫稳定性分析方法对智能车的轨迹跟踪进行了优化设计,在反演控制算法的基础上构造虚拟控制量,其流程如图3所示。首先建立智能车运动学模型,将参考轨迹与

当前实际智能车位姿进行位姿误差分析,并将位姿误差连同参考智能车速度和角速度传输到所设计的智能车轨迹跟踪控制器中,经过轨迹跟踪控制器计算出控制智能车运行的车速和角速度。

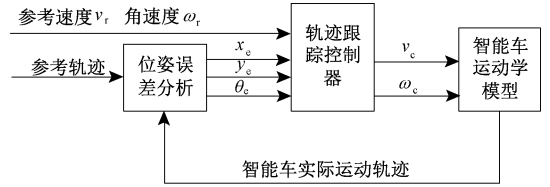


图3 智能车轨迹跟踪算法流程  
Fig.3 Flow chart of smart car trajectory tracking algorithm

### 2.2 算法设计

反演控制的基本设计方法是从一个高阶系统的内核开始,设计虚拟控制律保证内核系统的某种性能,如稳定性、无源性等;然后再对得到的虚拟控制律逐步修正,但应保证李雅普诺夫函数的既定性能,进而设计出真正的镇定控制器,实现系统的全局调节或跟踪,使系统达到期望的性能指标<sup>[19]</sup>。反演控制算法设计过程十分清晰明了,具有系统化、结构化的特点;对于阶数是  $n$  的非线性系统也可以取得很好的控制效果,消除了经典无源性设计中相对阶只能是一阶的限制,在针对控制不确定的非线性系统中有着明显的优越性<sup>[20]</sup>。

反演控制算法是将一个非线性系统分解成若干个低阶子系统,然后对各个子系统在设计相应的虚拟控制量。因此,对于智能车位姿误差中的  $X$  轴方向的误差分量构造虚拟控制量:

$$\tilde{x}_e = x_e - a_1 y_e \arctan(\omega) \quad (9)$$

其中,  $a_1 > 0$ 。

### 2.3 算法分析

根据李雅普诺夫函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} y_e^2 \quad (10)$$

对式(10)进行求导可得:

$$V'_1 = y_e y'_e = -y_e x_e \omega + y_e v_r \sin \theta_e \leq 0 \quad (11)$$

根据李雅普诺夫函数的判定定理该函数收敛,在控制系统中,对于任意  $x \in R$  且  $(|x| < \infty)$ , 有  $\psi(x) = x \sin(\arctan x) \geq 0$ , 当且仅当  $x = 0$  时等号成立。因此,设计的控制系统就是要使控制律实现  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = 0$  和  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_e = 0$ 。

综合上述分析,得到控制系统的李雅普诺夫函数为:

$$V = \frac{1}{2} b \tilde{x}_e^2 + \frac{1}{2} a_2 y_e^2 + \frac{1}{2} a_3 \delta_e^2 \quad (12)$$

其中,  $b > 0, a_2 > 0, a_3 > 0$ 。于是可以得到:

$$V' = b\tilde{x}_e\tilde{x}'_e + a_2y_e y'_e + a_3\delta_e\delta'_e =$$

$$b\tilde{x}_e \left[ -v + v_d \cos(\delta_e) - \frac{a_1 y_e}{1 + \omega^2} \dot{\omega} - \right.$$

$$\left. a_1 v_d \sin(\delta_e) \arctan(\omega) + a_1 x_e \omega \arctan(\omega) \right] -$$

$$\frac{a_1 a_2}{1 + \omega^2} y_e^2 + a_3 \delta_e (\omega_d - \omega) \quad (13)$$

根据李雅普诺夫收敛性质,计算出系统的控制律:

$$\begin{cases} v = v_d \cos(\delta_e) - \frac{a_1 y_e}{1 + \omega^2} \dot{\omega} - a_1 v_d \sin(\delta_e) \arctan(\omega) + \\ a_1 x_e \omega \arctan(\omega) + [x_e - a_1 y_e \arctan(\omega)] \\ \omega = \omega_d + \delta_e \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12),得到:

$$\dot{V} = -b\tilde{x}_e^2 - \frac{a_1 a_2}{1 + \omega^2} y_e^2 - a_3 \delta_e^2 \leq 0 \quad (15)$$

由于  $\forall t \in [0, +\infty)$ ,  $x_e, y_e, \delta_e$  有界,根据李雅普诺夫稳定性定理可知系统是渐进稳定的。

### 3 仿真实验分析

为了验证本文设计的智能车轨迹跟踪控制系统的合理性,本文利用 MATLAB/Simulink 库对系统进行仿真试验,如图 4 所示。设定  $x_d = \cos(\pi t)$ ,  $y_d = \sin(\pi t)$ ,  $\theta_d = 1 \text{ rad/s}$ ,  $v_r = 1 \text{ m/s}$ ,即参考轨迹是一个匀速运动的圆轨迹。假设智能车的初始位姿为  $(1.4 \ 0.1 \ 2\pi/3)$ 。

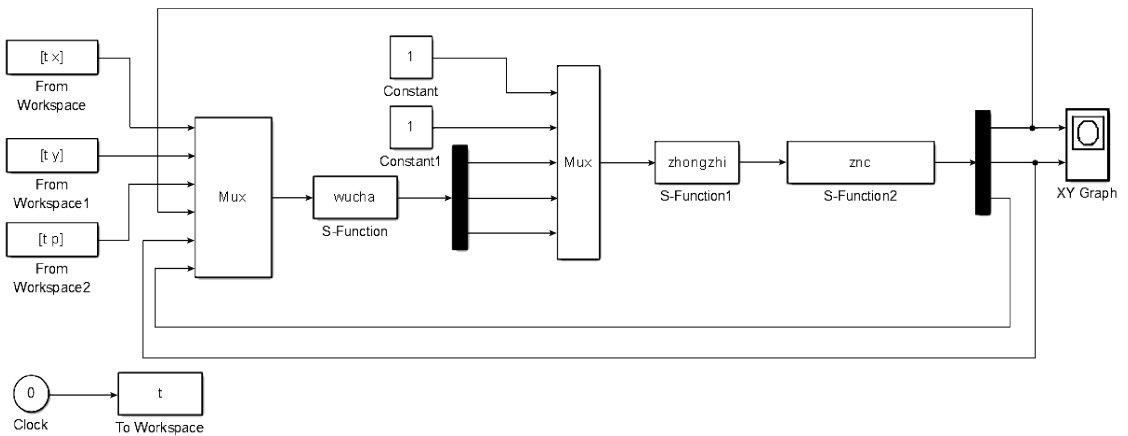


图 4 智能控车制系统仿真结构

Fig. 4 Simulation structure of intelligent vehicle control system

在图 4 建立的智能车运动控制 Simulink 仿真模型基础上,通过 MATLAB 的数据分析工具分析控制器的优化结果及智能车对目标路径的跟踪效果,如图 5~7 所示。

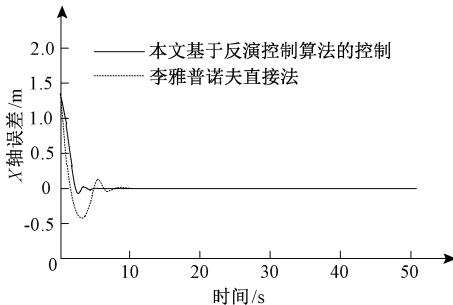


图 5 X 轴跟踪误差

Fig. 5 X-axis tracking error

由图 5 可知,基于反演控制算法设计的控制器使智能车能较快地跟踪到参考轨迹,到 2.4 s 时,本文设计的控制率在 X 轴误差绝对值小于 0.02 m;而在李雅普诺夫直接法控制下直到 8.27 s 时,X 轴误差绝对值才小于

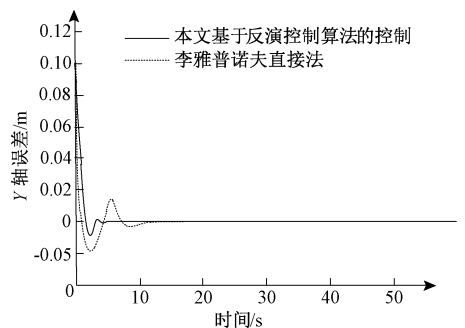


图 6 Y 轴跟踪误差

Fig. 6 Y-axis tracking error

0.02 m,耗时相对于本文设计的方法增加了 7.40 s。

由图 6 可知,本文设计的控制率在 Y 轴误差绝对值小于 0.001 m;而在李雅普诺夫直接法控制下直到 9.05 s 时,Y 轴误差绝对值才小于 0.001 m,耗时相对于本文设计的方法增加了 6.65 s。

由图 7(a)可知,两种方法都可以实现参考航向角的跟踪。由图 7(b)可知,本文优化设计的轨迹跟踪控制系

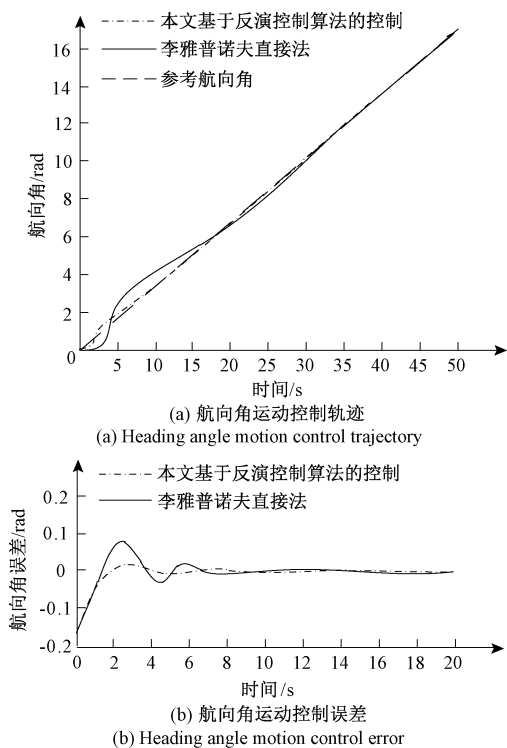


图7 航向角跟踪效果

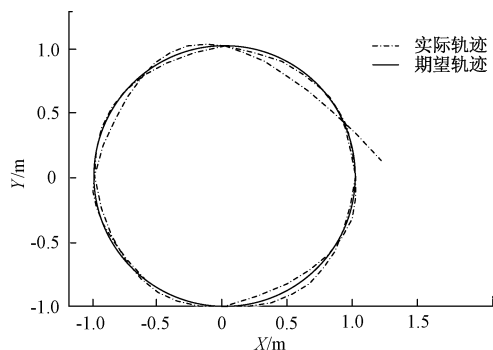
Fig. 7 Tracking effects of course angle

统和基于李雅普诺夫直接法设计的控制系统航向角跟踪都出现了抖振现象。在前者控制下,负向航向角误差最小值为 0.026 rad,正向航向角误差达到 0.004 rad,到 6 s,航向角误差绝对值小于 0.001 rad;而在基于李雅普诺夫直接法控制下,负向航向角误差最小值为 0.573 rad,正向航向角误差最大达到 0.996 rad,到 8.15 s时,航向角误差绝对值小于 0.001 rad。由此可知,在本文优化设计的轨迹跟踪控制系统控制下抖振现象明显减弱,而且实时性也得到了提高。

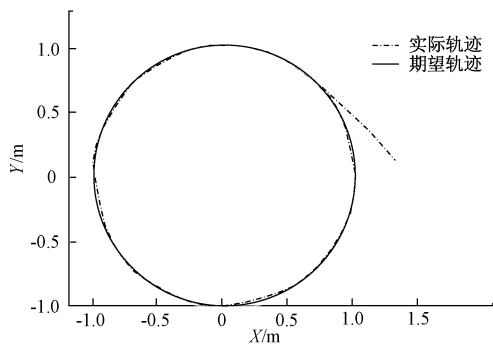
控制系统的仿真结果如图 8 所示,其中图 8(a)为基于李雅普诺夫直接法设计的控制系统仿真结果,图 8(b)为本文设计的控制系统仿真结果。对比图 8(a)、(b)可知,与基于李雅普诺夫直接法设计的控制系统相比,本文优化设计的轨迹跟踪控制系统具有更好的实时性且跟踪精度好。

本文还对比了迭代法对控制系统的控制效果,迭代法次数越多,精度越高,准确性越好,但相应的耗时和时效性相比本文设计的控制系统较差,不能满足智能车实时性的要求。

为检验所设计的轨迹跟踪控制算法的有效性,对智能车在不同车速下运动情况进行仿真实验。在其它条件相同的情况下,使车辆分别以 1、10、20 m/s 的速度进行轨迹跟踪,观察智能车在控制器下的操纵稳定性与有效性。仿真结果如图 9~11 所示。



(a) 基于李雅普诺夫直接法的轨迹跟踪控制图  
(a) Trajectory tracking control chart based on Lyapunov direct method



(b) 基于反演控制算法的轨迹跟踪控制图  
(b) Trajectory tracking control chart based on inversion control algorithm

图8 控制仿真结果

Fig. 8 Control simulation results

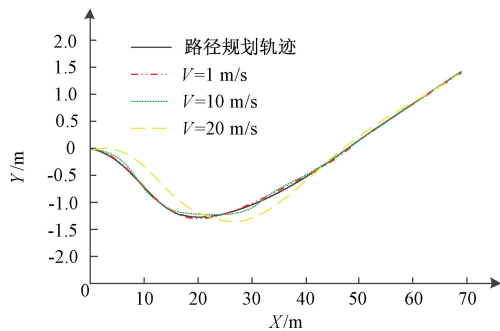


图9 路径跟随

Fig. 9 Path following

由图 9 可知,本文设计的控制器在中低速运行下的整体路径跟随效果相较于高速情况更好。由图 10 可知,在智能车速度越来越快时,智能车的侧偏角明显增大,所以在高速情况下本文设计的控制器对智能车的控制效果较差,且稳定性也相对降低。由图 11 可知,智能车在中低速情况下的横摆角较大,这是由于智能车在中低速运行的情况下,具有更高的侧向动力学稳定裕度,横摆角的增大可提高车辆的灵活性,而在智能车高速运行下,车辆的稳定性降低,此时智能车的横摆角度值较小,可以满足使智能车动力学稳定的需求。综合可知,本文所提出的

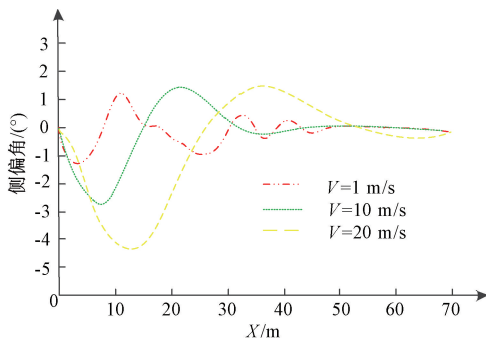


图 10 侧偏角

Fig. 10 Slip angle

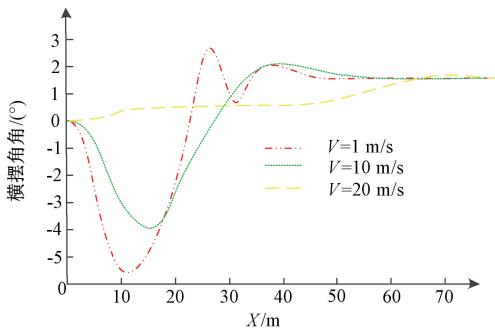


图 11 横摆角

Fig. 11 Yaw angle

控制算法可以有效地控制智能车满足不同车速下的轨迹跟踪要求。

仿真试验的结果表明,本文优化设计的控制系统对设定轨迹的跟踪对比于李雅普诺夫直接法,大大提高了跟踪效率和跟踪精度;同时相比于迭代学习算法,本文设计的控制系统耗时短,实时性高。证明了本文设计的结合李雅普诺夫稳定性的反演控制算法具有很好的效果,实现了智能车轨迹跟踪控制的目标。同时通过控制智能车在不同车速下的轨迹跟踪,证明了本文设计的控制器可以很好的应对不同车速的要求。

## 4 结 论

针对智能车在实时运动过程中轨迹跟踪精度差的问题,本文基于反演控制算法对智能车的轨迹跟踪系统进行了优化设计。建立了智能车轨迹跟踪控制系统的运动学模型,并对该模型的位姿误差进行分析,提出误差模型,同时也建立了智能车的动态模型;为提高智能车运行的实时性,在反演控制算法的基础上,设计出合理的分部虚拟控制量,采用李雅普诺夫收敛定理对设计的控制系统进行合理性分析,根据分析结果提出了一套简单的控制律。最后对优化后的控制系统在 MATLAB/Simulink 库

上进行了仿真试验,结果表明:和基于迭代学习算法或者李雅普诺夫直接法设计的智能车轨迹跟踪控制系统相比较,本文设计的控制系统具有更好的实时性且跟踪精度高。同时在不同的车速下本文提出的控制系统也能很好的对智能车轨迹进行控制。

## 参考文献

- [1] 余铎,王耀南,毛建旭,等. 基于视觉的移动机器人目标跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 227-235.  
YU D, WANG Y N, MAO J X, et al. Vision-based mobile robot target tracking method [J] Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 227-235.
- [2] 范宜标,卢玮,傅智河. 自动驾驶场景下的鲁棒车辆检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 60-65.  
FAN Y B, LU W, FU ZH H. Robust vehicle detection in autonomous driving scenarios [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 60-65.
- [3] 张艳辉,徐坤,郑春花,等. 智能电动汽车信息感知技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 794-805.  
ZHANG Y H, XU K, ZHENG CH H, et al. Research progress of information perception technology for intelligent electric vehicles [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 794-805.
- [4] 黄刚,翟丽红. 智能车弯道行进算法的研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 122-131.  
HUANG G, ZHAI L H. Research and realization of the algorithm of intelligent vehicles on curves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 122-131.
- [5] 王富奎. 高动态环境下智能车局部路径规划研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
WANG F K. Local path planning of smart cars in high dynamic environment [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [6] WU P C, CHANG C Y, LIN C H. Lane-mark extraction for automobiles under complex conditions [J]. Pattern Recognition, 2014, 47(8): 2756-2767.
- [7] 杜井庆,高世桥,罗创,等. 基于 PID 算法的控制量按任意函数变化的一种控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1317-1323.  
DU J Q, GAO SH Q, LUO CH, et al. A control method based on PID algorithm for the control variable to change according to any function [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1317-1323.
- [8] 葛媛媛,张宏基. 基于自适应模糊滑模控制的机器人

- 轨迹跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 746-755.
- GE Y Y, ZHANG H J. Robot trajectory tracking algorithm based on adaptive fuzzy control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 746-755.
- [9] 张毅, 高进可, 王琪, 等. 视觉导引智能车的自适应路径识别及控制研究[J]. 测控技术, 2017, 36(11): 23-26.
- ZHANG Y, GAO J K, WANG Q, et al. Adaptive path recognition and control of vision guided intelligent vehicles [J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(11): 23-26.
- [10] HUNG N, VIET T D, IM J S, et al. Motion control of an omnidirectional mobile platform for trajectory tracking using an integral sliding mode controller [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(6): 1221-1231.
- [11] ASLAM J, QIN S Y, ALVI M. Fuzzy sliding mode control algorithm for a four-wheel skid steer vehicle[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(8): 3301-3310.
- [12] 裴九芳, 王海, 许德章. 基于迭代学习控制的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(9): 222-225.
- PEI J F, WANG H, XU D ZH. Trajectory tracking control of mobile robot based on iterative learning control [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(9): 222-225.
- [13] 李兵. 基于联合仿真的智能车辆路径跟踪控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LI B. Intelligent vehicle path tracking control based on co-simulation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [14] KAUSAR Z, STOL K, PATEL N. Nonlinear control design using Lyapunov function for two-wheeled mobile robots [C]. 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), IEEE, 2012: 123-128.
- [15] 张炳力, 吕敏煜, 程进, 沈干. 两点预瞄轨迹跟踪横向控制系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 158-163.
- ZHANG B L, LU M Y, CHENG J, SHEN G. Two-point preview trajectory tracking lateral control system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5): 158-163.
- [16] 高申勇, 许方镇, 郭鸿杰. 基于弹簧模型的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 796-803.
- GAO S Y, XU F Z, GUO H J. Research on path planning of mobile robot based on spring model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 796-803.
- [17] MARTIN T C, ORCHARD M E, SANCHEZ P V. Design and simulation of control strategies for trajectory tracking in an autonomous ground vehicle [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(24): 118-123.
- [18] 黄超杰. 视觉导航智能车避障路径规划及横向控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- HUANG CH J. Vision navigation intelligent vehicle obstacle avoidance path planning and lateral control [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [19] 王猛, 靳伍银, 王安. 轮式机器人轨迹跟踪控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10): 102-107.
- WANG M, JIN W Y, WANG AN. Design of trajectory tracking control system for wheeled robots[J]. Journal of Computer Measurement and Control, 2017, 25(10): 102-107.
- [20] 韩珂. 飞艇建模分析与反演控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- HAN D. Airship modeling analysis and inversion control research [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016.

## 作者简介



储开斌, 1997年于江苏理工学院获得学士学位, 2010年于常州大学获得硕士学位, 现为常州大学副教授, 主要研究方向为仪器仪表及智能制造等方向。

E-mail: ckb910@163.com

**Chu Kaibin** received B. Sc. from Jiangsu University of Technology in 1997, and M. Sc. from Changzhou University in 2010, respectively. Now he is an associate professor at Changzhou University. His main research interests include direction of instrumentation and intelligent manufacturing.



郭俊俊, 2017年于江苏理工学院获得学士学位, 现为常州大学硕士研究生, 主要研究方向为智能车自主导航。

E-mail: 1398217372@qq.com

**Guo Junjun** received B. Sc. from Jiangsu University of Technology in 2017. He is currently a M. Sc. candidate at Changzhou University. His main research interest includes self-navigation of smart cars.