

基于趋近律滑模控制的智能车辆轨迹跟踪研究

姜立标 吴中伟

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 针对目前已有智能车辆轨迹跟踪控制存在跟踪精度低、鲁棒性弱等问题,结合滑模控制响应迅速、抗干扰能力强的优点,提出一种基于趋近律的滑模控制方法。提出的趋近律通过特殊幂次函数和反双曲正弦函数的组合,提高了系统状态的趋近速度并且平滑和限制了抖振现象,可实现控制车辆平顺快速跟踪参考轨迹。在 Simulink 软件上搭建了车辆运动学模型并进行轨迹跟踪仿真实验,通过与双幂次趋近律滑模控制进行对比验证了控制效果。仿真实验结果表明,相对于双幂次趋近律滑模控制,提出的趋近律滑模控制的车辆能更快地跟踪到参考轨迹,横向和纵向误差收敛速度明显增快,航向角抖振现象减弱,系统具有更快的趋近速度,并且抖振现象被削弱。

关键词: 车辆; 轨迹跟踪; 滑模控制; 趋近律; 仿真

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0381-06

Sliding Mode Control for Intelligent Vehicle Trajectory Tracking Based on Reaching Law

JIANG Libiao WU Zhongwei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The existing intelligent vehicle trajectory tracking controller have the problems such as low tracking accuracy and weak robustness. In order to solve these problems and improve track tracking effect, a sliding mode control method based on a new reaching law was proposed because the sliding mode control had the advantages of quick response and strong anti-interference ability. The new reaching law was the combination of a special function and a inverse hyperbolic sine, which made sure that the system state can approach the sliding surface quickly whether it was near the sliding surface or not. The law really avoided the shortcoming of the traditional algorithms and improved the approaching speed of the controlled system and limited the vibration. The controller that used this method can control the vehicle to track the reference trajectory quickly. In order to prove the effectiveness of this method, a vehicle kinematics model was built and the trajectory simulation experiment was carried out in Simulink to compare the control effect of the new reaching law with the double power reaching law. The results of the simulation verified that the new reaching law had higher approaching speed and weaker vibration and it had better control effect. Controlled by the sliding mode control method based on the new reaching law, the convergence speed of horizontal and vertical errors of the vehicle kinematics model was significantly increased, the vibration of course angle error became weak, and the vehicle kinematics model can track the trajectory faster.

Key words: vehicle; trajectory tracking; sliding mode control; reaching law; simulation

0 引言

智能车辆是一个典型的时延、非线性系统,其模型参数具有不确定性,再加上实际运动过程中外部干扰的存在,其轨迹跟踪控制器设计难度较高。滑

模控制具有快速响应、对参数变化及扰动不敏感、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点^[1-3],被应用在车辆以及类车机器人轨迹跟踪控制等方面^[4-5]。

轨迹跟踪控制技术一直受到国内外学者的关注。在类车机器人跟踪控制方面,HUNG 等^[6]在全

收稿日期: 2017-08-14 修回日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51305139)

作者简介: 姜立标(1965—),男,副教授,博士,主要从事车辆系统动力学与电子控制和智能驾驶研究,E-mail: jlb620620@163.com

向移动平台上使用自适应滑模控制跟踪目标轨迹。KUNAR等^[7]基于 Backstepping 反演控制的方法设计四轮机器人轨迹跟踪控制律。ASLAM等^[8]则使用模糊滑模控制对滑移转向车辆进行轨迹跟踪控制。邵俊恺等^[9]提出了基于强化学习的自适应 PID 路径跟踪控制器,实现无人驾驶铰接式车辆的路径跟踪控制。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^[10]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,使智能车辆能够较好地跟踪期望轨迹。文献[11-12]结合模糊算法和神经网络算法设计了车辆轨迹跟踪控制器。文献[13-15]则在无人驾驶车辆上使用模型预测控制方法进行轨迹跟踪控制。然而在实际应用中上述算法仍存在限制:模型预测算法控制精度较高但在线优化耗时过长,不能满足跟踪控制实时性要求;神经网络算法则需要大量精确数据进行训练,成本较高^[16]。

针对智能车辆的轨迹跟踪控制,本文提出一种基于趋近律滑模控制的轨迹跟踪控制器,通过特殊函数和反双曲正弦函数的组合,以期系统能够在任意状态都能以较大速度趋近滑模面并且平滑、限制抖振,避免现有趋近律滑模控制趋近速度慢、抖振现象较大的缺陷。

1 智能车辆系统

智能车辆是一个集感知、决策、控制、执行等功能于一体的综合系统^[17-18],如图1所示。它集中运用了计算机、传感、信息融合、通讯、人工智能及自动控制等技术,是典型的高新技术综合体。

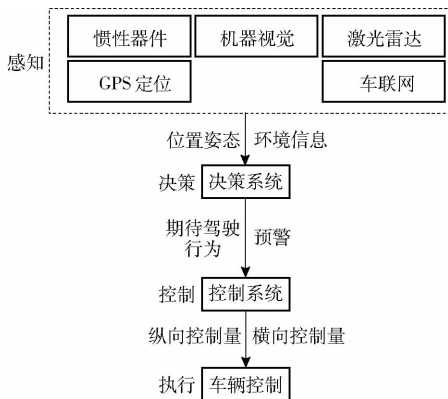


图1 智能车辆系统

Fig.1 Intelligent vehicle system

轨迹跟踪控制是决策规划系统与运动控制系统中的一部分,是智能车辆环境感知和车辆控制之间的桥梁。智能车辆从传感器中获取环境以及车辆信息,通过决策系统形成期待驾驶行为,接着通过控制系统对车辆进行控制,使车辆安全地从当前位置行驶到目标位置。

研究车辆轨迹跟踪控制的目的是在有限环境信息和车辆信息情况下,通过提高智能车辆合理决策和控制能力,形成安全可靠的目标驾驶行为,并控制车辆驾驶行为,从而提高驾驶安全性。

2 车辆运动模型

2.1 车辆运动过程分析

假设车辆运动过程为低速运动过程,忽略车轮侧向滑动,车辆在行驶中不出现侧向力,由此建立车辆运动学模型,如图2所示。

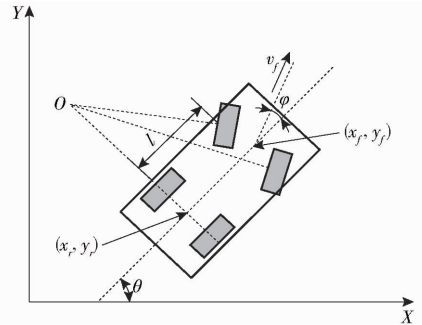


图2 车辆运动学模型示意图

Fig.2 Sketch of vehicle kinematics model

图中, θ 为车辆车身与坐标系X轴的夹角, φ 为等效前轮转角, l 为车辆轴距, v_f 为车辆前轴中心点的速度, (x_f, y_f) 为车辆前轮轴中心坐标, (x_r, y_r) 为车辆后轮轴中心坐标。

为方便计算,将四轮车简化为虚拟的两轮车,如图3所示。由几何关系得到简化前后前轮转角的关系式

$$\cot\alpha + \cot\beta = 2\cot\varphi \quad (1)$$

式中 α ——外轮转角 β ——内轮转角

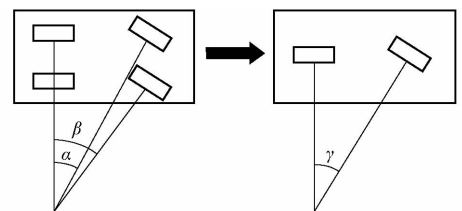


图3 等效前轮转角示意图

Fig.3 Sketch of equivalent front wheel angle

由假设条件可知,车辆运动学模型本身符合非完整性约束条件,即

$$\dot{y}_r \cos\theta - \dot{x}_r \sin\theta = 0 \quad (2)$$

由图2可知

$$\begin{cases} x_r = x_f - l\cos\theta \\ y_r = y_f - l\sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)进行求导得

$$\begin{cases} \dot{x}_r = \dot{x}_f + \dot{\theta}l\sin\theta \\ \dot{y}_r = \dot{y}_f - \dot{\theta}l\cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),可得

$$\dot{y}_f \cos \theta - \dot{x}_f \sin \theta = \dot{\theta} l \quad (5)$$

又由图2,可得

$$\begin{cases} \dot{x}_f = v_f \cos(\theta + \varphi) \\ \dot{y}_f = v_f \sin(\theta + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得

$$\dot{\theta} = \frac{v_f \sin \varphi}{l} \quad (7)$$

由式(4)、式(6)、式(7)得

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_f \cos \theta \cos \varphi \\ \dot{y}_r = v_f \sin \theta \cos \varphi \end{cases} \quad (8)$$

所以,对于前轮转向的车辆,以后轴中点为参考点,其连续的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_f \cos \theta \cos \varphi = v \cos \theta \\ \dot{y}_r = v_f \sin \theta \cos \varphi = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = v_f \sin \varphi / l = v \tan \varphi / l \end{cases} \quad (9)$$

式中 v ——后轴中点处速度,其方向垂直于后轴轴线

车辆的位姿可由后轮中点在坐标系中的位置以及车辆航向角来表示,可以描述为 $\boldsymbol{p} = (x, y, \theta)$ 。为简化表达式,使用向量 $\boldsymbol{q} = (v, \omega)$ 表示车辆的线速度和角速度控制量。同时令

$$\dot{\theta} = \omega = v \tan \varphi / l$$

则车辆运动学方程可以表示为

$$\dot{\boldsymbol{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

假定车辆最大等效前轮转角为 φ_{\max} ,则后轴中点最小的转弯半径为 ρ_{\min} ,则对应的角速度范围

$$\begin{cases} \rho_{\min} = \tan \varphi_{\max} / l \\ \omega \leq v / \rho_{\min} \end{cases}$$

2.2 系统误差分析

如图4车辆位姿图所示,用 (x_c, y_c, θ_c) 表示车辆的当前位置, (x_r, y_r, θ_r) 表示参考的目标位置,则车辆的位姿误差为

$$\boldsymbol{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e & 0 \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

对式(11)进行微分,结合式(10)和参考的控制输入 $\boldsymbol{q}_r = (v_r, \omega_r)$,可以得到系统误差的微分方程

$$\dot{\boldsymbol{p}}_e = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

车辆的轨迹跟踪控制目标是寻找到合适的控制输入 $\boldsymbol{q} = (v, \omega)$,对车辆在任意的初始误差情况下,

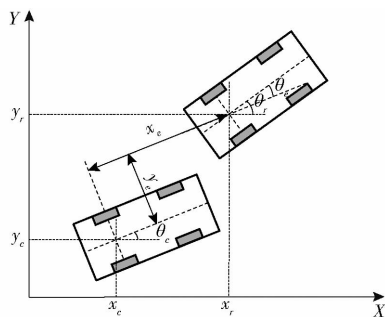


图4 车辆位姿

Fig. 4 Vehicle position

系统在该控制输入下,使得误差 \boldsymbol{p}_e 有界且不断趋向于0,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{p}_e\| = 0 \quad (13)$$

3 车辆轨迹跟踪控制器设计

3.1 算法流程

为了减小轨迹跟踪的误差,提出了基于趋近律滑模控制的轨迹跟踪控制算法,其流程如图5所示。首先建立车辆运动学模型,将参考轨迹与当前实际车辆位姿进行位姿误差分析,并将位姿误差连同参考车辆速度和角速度输入到所设计的轨迹跟踪控制器中,从而获得需要的控制车辆跟踪参考轨迹的车速和角速度。

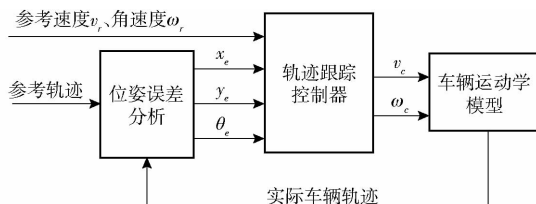


图5 算法流程

Fig. 5 Algorithm process

3.2 控制器设计

反步(Back-stepping)控制设计方法因为可将控制器的设计与基于Lyapunov稳定性的证明相结合、可将高阶系统划分为若干个低阶子系统、控制器结构清晰等特点,在非线系统得到了广泛的应用^[19-20]。因此,采用此方法设计智能车辆轨迹跟踪控制的滑模控制切换函数。

引理1:对于任意 $x \in \mathbf{R}$ 并且 $|x| < \infty$,有 $\phi(x) = x \sin(\arctan x) \geq 0$,当且仅当 $x = 0$ 时等号成立。

根据上述引理设计滑模切换函数。

当 $x_e = 0$ 时,考察Lyapunov函数

$$V_y = \frac{1}{2} y_e^2 \quad (14)$$

对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= y_e \dot{y}_e = y_e (-x_e \omega + v_r \sin \theta_e) = \\ &= -y_e x_e \omega + y_e v_r \sin \theta_e \end{aligned} \quad (15)$$

令 $\theta_e = -\arctan(v_r y_e)$, 那 $v_r y_e \arctan(v_r y_e) \geq 0$, 当且仅当 $v_r y_e = 0$ 时等号成立, 则

$$\dot{V}_y \leq 0$$

所以只要 x_e 收敛到 0 且 θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r y_e)$, 则系统状态 y_e 收敛到 0。

根据上述结论设计切换函数

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e + \arctan(v_r y_e) \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过控制输入, 使得 s_1 趋向于 0, s_2 趋向于 0, 即实现 x_e 收敛到 0 同时 θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r y_e)$, 从而实现 y_e 趋向于 0, θ_e 趋向于 0。

对滑模变结构控制而言, 不连续开关特性会引起系统的抖振。同时理想滑模变结构控制系统的假设条件对于实际控制系统不可能完全成立。所以抖振无法消除而且消除了抖振也就消除了变结构控制的抗扰动抗扰动的能力, 因此, 完全消除抖振是不可能的, 只能将抖振削弱到一定的范围^[21-22]。

为使系统能快速接近切换面, 并且进一步改善其抖振现象, 采用新型趋近律^[23]

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{fal}(s, \eta, \delta) - k \text{arsh}(s) \quad (17)$$

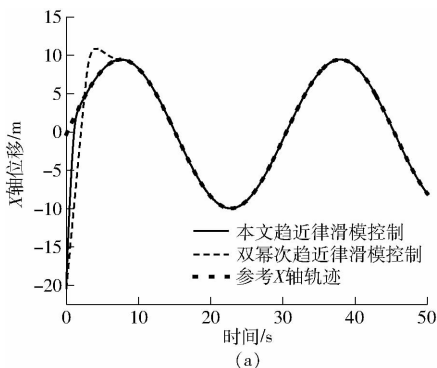
其中

$$\text{fal}(s, \eta, \delta) = \begin{cases} |s|^\eta \text{sign}(s) & (|s| > \delta) \\ \frac{s}{\delta^{1-\eta}} & (|s| \leq \delta) \end{cases}$$

式中 $0 < \delta < 1$, $\eta > 0$, $\varepsilon > 0$, δ 为 $\text{fal}(s, \eta, \delta)$ 在原点附近正负对称线性段的区间长度, 并且 $\text{fal}(s, \eta, \delta)$ 为非连续函数。

当 $|s| \leq \delta$ 时, 即 s 接近 0 时, 式(17)第 1 项可以使得系统趋近速度变大, 使得系统状态在有限时间之内快速到达滑动面, 同时在滑动面附近的 $\text{fal}(s, \eta, \delta)$ 是光滑连续的, 控制输入的高频震动现象被有效削弱。而且式(17)的第 2 项也是光滑连续函数, 当 $|s| > \delta$ 时, 能保证系统状态可以较大的速度趋近滑动面并且起到平滑和限幅的作用。

令 $\zeta = \arctan(v_r y_e)$, 则系统的趋近律可表示为



$$\dot{s} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 \text{arsh}(s_1) - \varepsilon_1 \text{fal}(s_1, \eta_1, \delta_1) \\ -k_2 \text{arsh}(s_2) - \varepsilon_2 \text{fal}(s_2, \eta_2, \delta_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega_c - v_c + v_r \cos \theta_e \\ \omega_r - \omega_c + \frac{\partial \zeta}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \zeta}{\partial y_e} (-x_e \omega_c + v_r \sin \theta_e) \end{bmatrix} \quad (18)$$

整理式(18)可以得到控制律

$$q = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e - \dot{s}_1 \\ \frac{\omega_r + \frac{\partial \zeta}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \zeta}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e) - \dot{s}_2}{1 + \frac{\partial \zeta}{\partial y_e} x_e} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中 $\frac{\partial \zeta}{\partial v_r} = \frac{y_e}{1 + (v_r y_e)^2}$ $\frac{\partial \zeta}{\partial y_e} = \frac{v_r}{1 + (v_r y_e)^2}$

4 仿真结果分析

为验证上述基于新型趋近律滑膜控制器的控制效果, 根据第 2、3 节内容在 Simulink 软件上搭建被控对象——智能车辆的运动学模型和本文提出的轨迹跟踪控制器。式(18)中新型趋近律滑模控制参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameter setting

参数	数值	参数	数值
δ_1	0.02	η_1	0.5
δ_2	0.02	η_2	0.5
k_1	6	ε_1	0.01
k_2	6	ε_2	0.01

设定参考轨迹是目标线速度和角速度都是匀速运动的圆轨迹, 取 $\omega_r = 0.2 \text{ rad/s}$, $v_r = 2 \text{ m/s}$, 则 $v_r' = 0 \text{ m/s}^2$ 。位姿误差初始值取 $p_e(0) = (20, 6, 0)$ 。仿真结果如图 6 所示。

由图 6a 可知, 在本文趋近律控制和双幂次趋近律控制下, 车辆都能跟踪到参考的 X 轴轨迹。但是由图 6b 可知, 在本文趋近律控制下车辆能较快地跟

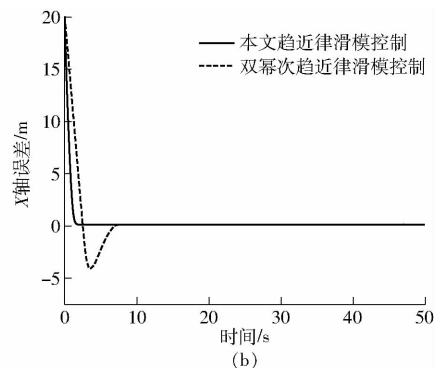


图 6 X 轴轨迹跟踪效果

Fig.6 Trajectory tracking effects of X axis

踪到参考轨迹,到 1.87 s 时, X 轴误差绝对值小于 0.020 m;而在双幂次趋近律控制下直到 9.27 s, X 轴误差绝对值才小于 0.020 m,耗时比前者增加 7.40 s。而且本文趋近律在接近滑模面时趋近速度明显减慢,能平滑地靠近滑模面;而后者在首次接近滑模面时具有较大的趋近速度,使系统状态穿过滑模面,仍以一定速度向负方向继续运动,负向 X 轴误差最小值为 -4.212 m,随后才逐渐趋向于 0。

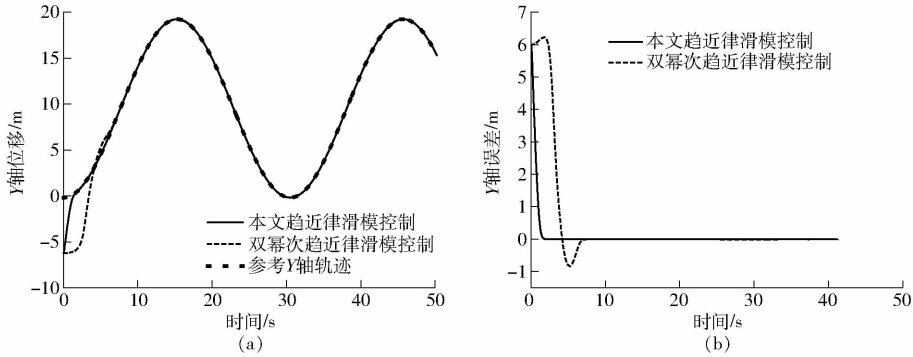


图 7 Y 轴轨迹跟踪效果
Fig. 7 Trajectory tracking effects of Y axis

由图 8a 可知,两者都能跟踪到参考航向角。由图 8b 可知,趋近律的趋近速度明显高于双幂次趋近律。由图 8c 可知,本文趋近律和双幂次趋近律控制下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 -0.246 rad,正向航向角误差达到 0.004 rad,到 2.31 s,航向角误差绝对值小于 0.001 rad;而在双幂次趋近律控制下,负向航向角误差最小值为 -0.873 rad,正向航向角误差最大

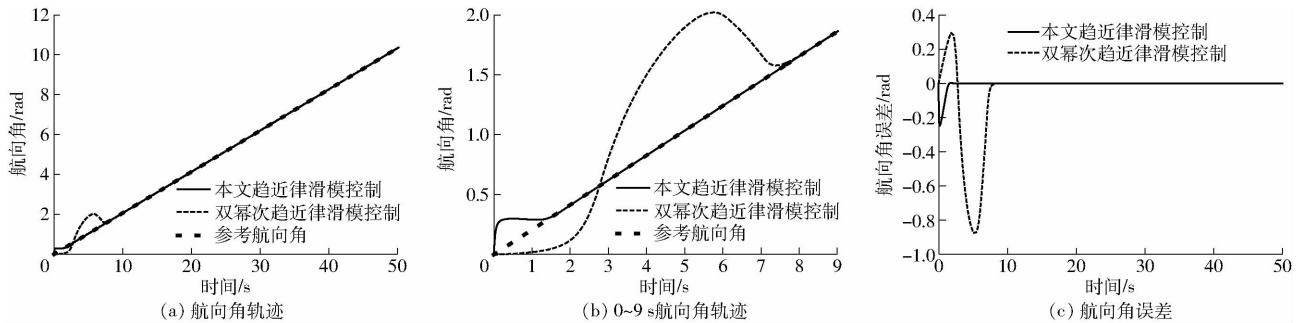


图 8 航向角跟踪效果
Fig. 8 Tracking effects of course angle

达到 0.296 rad,到 8.15 s 时,航向角误差绝对值小于 0.001 rad。由此可知,本文趋近律控制下抖振现象明显减弱,最大正向和负向航向角误差仅为双幂次趋近律的 1.351% 和 28.178%,到达航向角误差绝对值小于 0.001 rad 的时间缩短了 5.84 s。

由图 9 可以看出,在本文趋近律滑模控制下,车辆能很快地跟踪到参考轨迹,反应快速准确。而双幂次趋近律滑模控制虽然也能跟踪到参考轨迹,但是需要行驶更长的距离才能跟踪成功。相比之下,本文趋近律的跟踪效果更好。

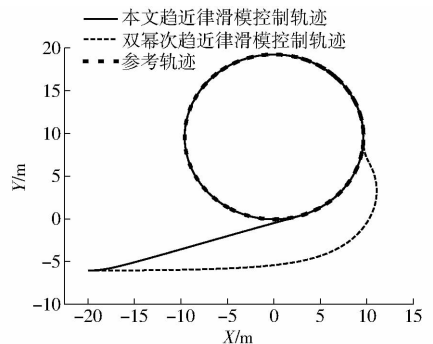


图 9 圆轨迹跟踪
Fig. 9 Curve following

5 结束语

以智能车辆作为研究对象,对其进行运动学分

析,并且提出了基于趋近律自适应滑模控制的轨迹跟踪控制算法,与双幂次趋近律跟踪控制算法进行

圆形轨迹跟踪 Simulink 对比仿真。通过仿真可知, 在本文趋近律滑模控制下, 系统 X 轴误差和 Y 轴误差收敛时间明显比双幂次趋近律滑模控制缩短, 航向角误差抖振现象减弱, 整体跟踪效果平滑快速, 其结果验证了基于本文趋近律的滑膜控制算法具备更快的趋近速度, 抖振现象明显削弱, 跟踪效果更优。

参 考 文 献

- 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 407-418. (in Chinese)
- 瞿少成. 不确定系统的滑模控制理论及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
QU Shaocheng. Study on sliding mode control theory and application for uncertain system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- 吴卫国, 陈辉堂, 王月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 326-331.
WU Weiguo, CHEN Huitang, WANG Yuejuan. Global trajectory tracking control of mobile robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(3): 326-331. (in Chinese)
- 闫茂德, 贺显曜, 吴青云. 移动机器人全局轨迹跟踪的自适应滑模控制[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(4): 97-100.
YAN Maode, HE Yuyao, WU Qingyun. Adaptive sliding mode control for the global trajectory tracking of mobile robots[J]. Microelectronics & Computer, 2006, 23(4): 97-100. (in Chinese)
- 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.
- KUNAR U, SUKAVANAM N. Backstepping based trajectory tracking control of a four wheeled mobile robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(4): 403-410.
- ASLAM J, QIN Shiyin, ALVI M A. Fuzzy sliding mode control algorithm for a four-wheel skid steer vehicle[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(8): 3301-3310.
- 邵俊恺, 赵翮, 杨珏, 等. 无人驾驶铰接式车辆强化学习路径跟踪控制算法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 376-382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170348&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.048.
- SHAO Junkai, ZHAO Xuan, YANG Jue, et al. Reinforcement learning algorithm for path following control of articulated vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 376-382. (in Chinese)
- 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 Bing. Research of intelligent vehicle trajectory tracking control based on collaborative simulation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 杨君, 马戎, 刘婷, 等. 基于模糊神经网络的智能车辆路径跟踪[J]. 计算机仿真, 2012, 29(7): 368-371.
YANG Jun, MA Rong, LIU Ting, et al. Path tracking of intelligent vehicle based on fuzzy neural network[J]. Computer Simulation, 2012, 29(7): 368-371. (in Chinese)
- 张琨, 崔胜民, 王剑锋. 基于模糊神经网络的智能车辆循迹控制[J]. 汽车工程, 2015, 37(1): 38-42, 77.
ZHANG Kun, CUI Shengmin, WANG Jianfeng. Path tracking control of intelligent vehicle based on fuzzy neural network[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1): 38-42, 77. (in Chinese)
- FITRI Y, YASUCHIKA M. Autonomous ground vehicle of path following control through model predictive control with feed forward controller [C]//12th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2014: 603-610.
- 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.
- 李培新, 姜小燕, 魏燕定, 等. 基于跟踪误差模型的无人驾驶车辆预测控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 351-357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171045&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.045.
- LI Peixin, JIANG Xiaoyan, WEI Yanding, et al. Predictive control of autonomous vehicle based on tracking-error model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 351-357. (in Chinese)
- 段建民, 夏天, 宋志雪. 基于联合仿真的智能车路径跟踪控制研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6): 129-134, 151.
DUAN Jianmin, XIA Tian, SONG Zhixue. Intelligent vehicle based on co-simulation[J]. Computer Simulation, 2017, 34(6): 129-134, 151. (in Chinese)
- 周勇. 智能车辆中几个关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
ZHOU Yong. Several key problems research of the intelligent vehicle[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- 王科. 城市交通中智能车辆环境感知方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
WANG Ke. Environment perception method of intelligent vehicle in urban traffic[D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- 田聪玲. 基于反步法的四旋翼飞行器非线性控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
TIAN Congling. Nonlinear control of quadrotor based on backstepping[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- 任慧荣. 类车移动机器人轨迹跟踪控制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
REN Huirong. Research on trajectory tracking control methods of car-like mobile robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 498-502.
LI Huijie, CAI Yuanli. Sliding mode control with double power reaching law[J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 498-502. (in Chinese)
- 张合新, 范金锁, 孟飞, 等. 一种新型滑模控制双幂次趋近律[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 289-293.
ZHANG Hexin, FAN Jinsuo, MENG Fei, et al. A new double power reaching law for sliding mode control[J]. Control and Decision, 2013, 28(2): 289-293. (in Chinese)
- 周涛. 基于一种新型趋近律的自适应滑模控制[J]. 控制与决策, 2017, 31(7): 1335-1338.
ZHOU Tao. Adaptive sliding control based on a new reaching law[J]. Control and Decision, 2017, 31(7): 1335-1338. (in Chinese)