

基于双效滑模控制策略的轨迹跟踪仿真研究

郭婧博, 刘 飞

上海工程技术大学, 机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2023年1月31日; 录用日期: 2023年3月2日; 发布日期: 2023年3月9日

摘 要

本文提出一种适用度较高的自动驾驶汽车轨迹跟踪控制策略。以车辆横向运动为控制目标, 首先以车辆质心侧偏角、横摆角速度和横向位移为控制变量, 构建三自由度车辆动力学模型。其次针对车辆行驶产生的横向偏差, 采用滑模控制方法设计双效控制策略, 计算补偿前轮转向角反馈给车辆, 进而调整车辆跟踪精度。最后在双移线路径下进行仿真, 并与传统Stanley方法进行对比分析, 结果表明, 所设计控制系统的跟踪策略不仅具有较好的鲁棒性, 同时适用于急速转向等紧急工况, 跟踪控制精度方面更是提升了20%~50%, 打破了以往跟踪控制策略的局限性。

关键词

自动驾驶, 滑模控制, 轨迹跟踪, 仿真验证

Simulation Study of Trajectory Tracking Based on Dual-Effect Sliding Mode Control Strategy

Jingbo Guo, Fei Liu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jan. 31st, 2023; accepted: Mar. 2nd, 2023; published: Mar. 9th, 2023

Abstract

This paper proposes a trajectory tracking control strategy for autonomous vehicles with high applicability. Taking the lateral motion of the vehicle as the control target, firstly, a three-degree-of-freedom vehicle dynamics model is constructed with the vehicle center-of-mass lateral deviation angle, transverse swing angular velocity and lateral displacement as the control variables. Secondly, for the lateral deviation generated by the vehicle driving, the sliding mode control me-

thod is used to design a dual-effect control strategy to calculate the compensated front wheel steering angle feedback to the vehicle, and then adjust the vehicle tracking accuracy. The results show that the tracking strategy designed by the control system not only has good robustness, but also is suitable for emergency conditions such as rapid steering, and the tracking control accuracy is improved by 20%~50%, which breaks the limitations of the previous tracking control strategy.

Keywords

Autonomous Vehicle, SMC, Trajectory Tracking, Simulation Verification

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自动驾驶技术作为汽车当前及未来主要发展方向, 主要通过车辆感知、决策规划及控制三大步骤实现, 其中控制技术作为核心技术之一决定了车辆执行性能。车辆的轨迹跟踪能力不仅是主要被控对象, 同时也是实现自动驾驶技术落地应用的一大难点, 目前出现的车辆协调避撞[1]、转向跟踪优化[2]等问题都涉及到此方向内容, 因此该方向的研究发展有助于提高汽车主动安全性, 对减少交通碰撞等问题大有裨益。

模型预测控制方法善于解决多约束非线性动力学问题[3], 因此在轨迹跟踪方面得到了广泛的应用。Mohammad 等人将此方法应用于非线性电动汽车的速度跟踪[4]; 麦克马斯特大学 Meshginqalam 等人提出新型两级模型预测速度控制算法, 可以实现车载计算资源实时求解[5]; 埃及开罗大学 Nada 基于此方法计算车辆转向角及角速度来跟踪期望路径。参考文献[6] [7]使用 MPC 设计一体化动态轨迹规划和跟踪控制器, 仿真结果表明仅在车速小于 50 km/h 时跟踪效果较好; 同时也有较多研究将此方法应用于车辆稳定性控制[8]、驾驶辅助系统应用等[9]。

滑模控制方法使得系统在动态过程中有目的地不断变化, 按照预定状态轨迹运动[10]。同济大学唐齐荣[11]、科威特大学 Elmokadem 等人[12]基于非线性扰动观测器的滑模控制器应用于水下航行器的轨迹跟踪控制中; 参考[13]提出一种基于积分 SMC 的复合非线性反馈控制技术, 将主动前轮转向和直接横摆力矩控制相结合, 实现了更准确、快速的自动驾驶车辆路径跟踪控制; 江苏大学陈鼎等人将反馈滑模控制应用于农业车辆的路径跟踪[14], 有助于农业智能技术发展, 降低人力投入成本。

参考文献[15] [16] [17]中同时结合以上两种方法对前轮的预期转向角进行跟踪, 验证转向电机故障情况下轨迹跟踪的有效性。除此之外还有基于模糊控制方法设计的集成控制器[18]、PI 跟踪控制器[19]等, 利用主动前轮转向调节, 控制跟踪车辆理想横摆角速度、质心侧滑角。

根据当前的研究成果看出, 轨迹跟踪控制研究在纵向方面取得较好进展, 但对于车辆横向控制方面的研究仍具有一定局限性。本文沿此方向展开, 首先明确轨迹跟踪所需被控变量即影响因素, 据此构建三自由度车辆动力学模型。其次针对车辆实际行驶轨迹与期望轨迹间产生的横向偏差, 采用滑模控制方法设计双效控制策略, 计算补偿前轮转向角反馈给车辆, 进而调整车辆跟踪精度。最后取转向曲率较大的极限路径下进行高速仿真试验, 与传统 Stanley [20]方法进行对比分析, 验证所提出控制器的适应能力及跟踪精度。

2. 车辆模型搭建

动力学模型的建立是研究车辆轨迹跟踪仿真的前提和基础, 本章考虑车辆横向位移及横摆运动, 基于转向角及轮胎特性, 建立三自由度车辆动力学模型。如图 1 所示, 黄色质心点将车辆分为两部分。右侧红点为车辆前轮中心点, 来自地面的力分解为沿车身方向 x 的力 F_x 和垂直于车身方向的力 F_y , v_f 指的是前轮速度方向(可分解为横向速度 v_{cf} 和沿车轮中心线的速度 v_{lf}), v_x 为车辆纵向速度。受侧向力影响, 车辆速度不沿车辆中心线方向, δ_f 为前轮角(车轮中心线与 x 轴夹角), θ_v 为车辆前轮速度与 x 轴方向夹角。前后轮中心点到车辆质心距离分别为 l_f 、 l_r , 前后轮总距离为 L , γ 、 β 分别为车辆横摆角和质心侧偏角。

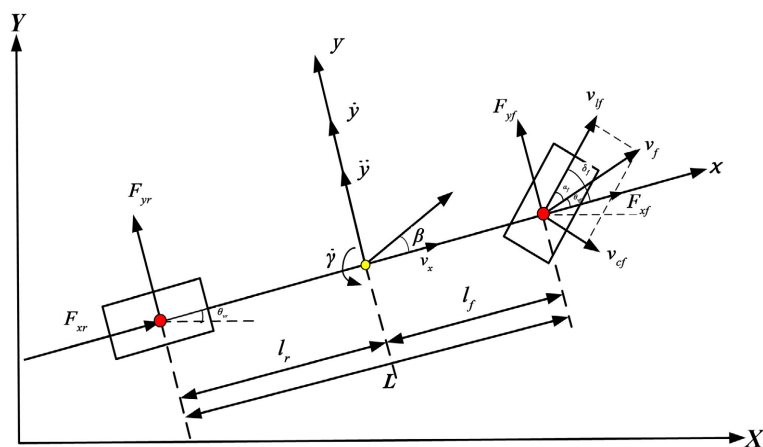


Figure 1. Vehicle model
图 1. 车辆模型

车身受力情况满足牛顿第二定律, 沿 y 轴的加速度 a_y 及垂直于 y 轴的加速度 a_0 , 组成车辆质心处的横向惯性加速度 \ddot{y} 。

$$\begin{cases} m\ddot{y} = F_{yf} + F_{yr} \\ \ddot{y} = a_y + a_0 \end{cases} \quad (1)$$

车辆转弯时通过方向盘角度信号判断转向意图, 然后分配轮胎纵向力在车辆质心周围产生直接横摆力矩 M_z 来调节车辆的横摆运动, 从而实现车辆在极端条件下的转向稳定性。 F_{yf} 、 F_{yr} 指地面施加在前后轮胎上的横向力, 车辆稳态行驶时, 前轮转向角 δ_f 非常小, 此时 $\cos \delta_f$ 近似为 1, 由此得出车辆受力及力矩方程如下, 其中 C_f 、 C_r 分别为前后轮胎刚度, α_f 、 α_r 为前后轮侧偏角:

$$\begin{aligned} F_{yf} &= C_f \alpha_f ; F_{yr} = C_r \alpha_r \\ \sum F_Y &= F_{yf} \cdot \cos \delta_f + F_{yr} = C_f \alpha_f + C_r \alpha_r \\ \sum M_Z &= l_f F_{yf} \cos \delta_f - l_r F_{yr} = C_f l_f \alpha_f - C_r l_r \alpha_r \end{aligned} \quad (2)$$

稳态行驶下的 β 可忽略不计, 根据车辆航向角 φ 与 γ 、 β 两者关系曲线可知, 此时的 φ 近似等于 γ , I_z 为转动惯量, 车辆沿 z 轴的力矩平衡方程可近似写为:

$$I_z \dot{\gamma} = F_{yf} l_f - F_{yr} l_r \quad (3)$$

调节车辆的转向方向就是对 δ_f 的控制, 因此将 δ_f 作为车辆模型输入变量, 观察相应的车辆角度参数变化规律。由式(1)~(3)可导出车辆模型的动力学方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z v_x} \gamma + \frac{C_f l_f - C_r l_r}{I_z v_x} \beta - \frac{C_f l_f}{I_z} \delta_f \\ \dot{\beta} = \left(\frac{C_f l_f - C_r l_r}{m v_x^2} - 1 \right) \gamma + \frac{C_f + C_r}{m v_x} \beta - \frac{C_f}{m} \delta_f \\ \dot{y} = -\frac{C_f + C_r}{m v_x} y - \left(v_x + \frac{C_f l_f - C_r l_r}{m v_x} \right) \gamma + \frac{C_f}{m} \delta_f \end{cases} \quad (4)$$

自动驾驶车辆横向控制主要分析车辆速度和位姿状态, 合理降低车辆模型复杂度可降低复杂工况下的计算量, 提高控制策略实时性。将上式转化为如下三自由度状态空间方程, γ 、 β 为状态空间方程变量。

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \\ y \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_f C_f \\ I_z \\ -C_f \\ m v_x \\ C_f \\ m \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x} & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} & 0 \\ \frac{l_f C_f - l_r C_r}{m v_x^2} - 1 & \frac{C_f + C_r}{m v_x} & 0 \\ -v_x + \frac{C_f l_f - C_r l_r}{m v_x} & 0 & -\frac{C_f + C_r}{m v_x} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. 轨迹跟踪控制器设计

一套完整的自动驾驶技术包含感知、决策和规划、控制四大模块。本章基于车辆行驶产生的两大偏差, 采用滑模控制方法设计双效轨迹跟踪控制策略, 使得车辆更好地沿预期轨迹行驶, 完成安全变道、避碰或超车的准确跟踪。如图 2 为控制策略设计思路:

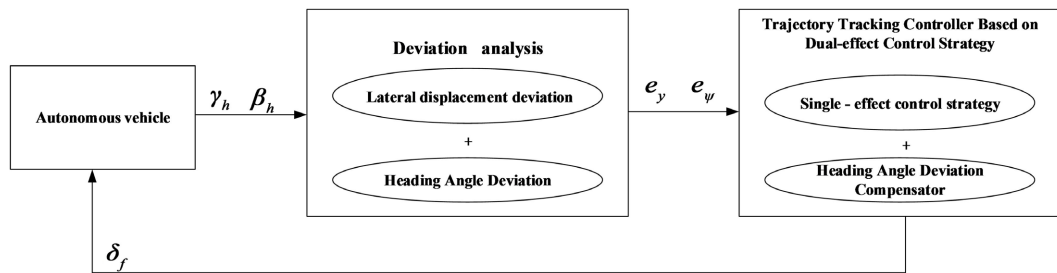


Figure 2. Control strategy flow chart
图 2. 控制策略流程图

3.1. 车辆行驶偏差分析

根据实车辆在高速公路上的实际行驶情况, 如遇到避撞、变道、超车等情况, 驾驶员通常会选择恒定纵向速度或短期加速的方式来实现转向过程, 以避免追尾等交通事故的产生。因此, 在假设车辆的纵

向速度恒定条件下, 定义车辆重心到目标曲线的距离为位移偏差 e_y , 沿 y 轴的横向加速度为位移偏差二阶导 $\ddot{e}_y = \ddot{y}_h - \ddot{y}_d$, 并带入公式(1)中得到车辆行驶速度与加速度关系如下:

$$\begin{aligned}\ddot{e}_y &= (a_y + v_x \gamma_h) - v_x \gamma_d \\ &= a_y + v_x (\gamma_h - \gamma_d) \\ a_y &= \ddot{e}_y + v_x \gamma_d - v_x \gamma; \quad v_y = \dot{e}_y - v_x e_\psi\end{aligned}\quad (6)$$

由于上述假设是线性非时变系统, 此时 $\dot{v}_x = 0$, $\ddot{\varphi}_d = \frac{\dot{v}_x}{R} = 0$, e_φ 为车辆中心速度与 x 轴夹角, 联立公式(4)车辆模型得到横向位移偏差表达式:

$$\begin{aligned}a_y &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} v_y - \left(v_x + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mv_x} \right) \dot{\varphi}_h + \frac{2C_f}{m} \delta_f \\ \ddot{e}_y + v_x \dot{\varphi}_d &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} (\dot{e}_y - v_x e_\varphi) - \left(v_x + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mv_x} \right) \dot{\varphi}_h + \frac{2C_f}{m} \delta_f \\ \ddot{e}_y &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} \dot{e}_y + \frac{2C_f + 2C_r}{m} e_\varphi + \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mv_x} \dot{e}_\varphi + \frac{2C_f}{m} \delta_f\end{aligned}\quad (7)$$

车辆航向角 φ 为质心速度与 x 轴夹角, 车辆沿预期轨迹行驶产生的航向角 φ_d 与实际航向角 φ_h 之差定义为第二个偏差变量 e_φ , 航向角速度偏差 $\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi}_h - \dot{\varphi}_d = \gamma_h - \gamma_d$, 航向角加速度偏差 $\ddot{e}_\varphi = \ddot{\varphi}_h - \ddot{\varphi}_d = \dot{\gamma}_h - \dot{\gamma}_d$, 联立公式(4)车辆模型得到横向角偏差表达式:

$$\begin{aligned}\ddot{e}_\varphi + \dot{\varphi}_d &= -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{v_x I_z} (\dot{e}_y - v_x e_\varphi) - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{v_x I_z} \dot{\psi} + \frac{2C_f l_f}{I_z} \delta_f \\ \ddot{e}_\varphi &= -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{v_x I_z} \dot{e}_y + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} e_\varphi - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{v_x I_z} \dot{e}_\varphi + \frac{2C_f l_f}{I_z} \delta_f\end{aligned}\quad (8)$$

结合公式(7)(8)及 e_y 、 e_φ 表达式, 得到基于跟踪偏差变量的被控变量状态空间表达式如下:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B\delta_f \\ \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} e_y \\ \dot{e}_y \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} & \frac{2C_f + 2C_r}{m} & -\frac{2C_f l_f + 2C_r l_r}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{v_x I_z} & \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} & -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{v_x I_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_y \\ \dot{e}_y \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2C_f}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_f l_f}{I_z} \end{pmatrix} \delta_f\end{aligned}\quad (9)$$

3.2. 横向位移偏差控制

e_y 的数学表达是指前轴中心与最近路径点距离的非线性反馈函数, 为使车辆按照规划路径进行转向行驶, 应保证 e_y 在有限时间内指数收敛为 0, 根据滑模变结构控制(SMC)模型条件, 对位移偏差进行整理:

$$\begin{aligned}x_1 &= e_y \\ \dot{x}_1 &= x_2 = \dot{e}_y \\ \dot{x}_2 &= F_{1(x)} + B_{1(x)} u\end{aligned}\quad (10)$$

结合公式(5)设计基于横向位移偏差 e_y 的滑模面:

$$\begin{aligned}
s_{11} &= c_1 x_1 + x_2 \\
\dot{s}_{11} &= c_1 \dot{e}_y + \ddot{e}_y \\
&= c_1 \dot{e}_y + (a_{22} \dot{e}_y + a_{23} e_\varphi + a_{24} \dot{e}_\varphi) + b_1 \delta_{f11} \\
a_{22} &= -\frac{2C_f + 2C_r}{mv_x}; & a_{23} &= \frac{2C_f + 2C_r}{m} \\
a_{24} &= \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mv_x}; & b_{22} &= \frac{2C_f}{m}
\end{aligned} \tag{11}$$

系统偏差的趋近速度会逐渐递减, 基础趋近律无法保证系统状态在有限时间内到达滑模面, 因此在基础趋近律基础上加入等速趋近项 $\dot{s}_{11} = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_{11}$, 得到指数趋近律 $\dot{s}_{11} = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_{11} - k_1 s_{11}$, 当接近滑模面时, 趋近速度 ε_1 大于零, ε_1 减小的同时增大 k_1 , 进而实现最佳的抖振削弱效果, 采用如下饱和函数代替符号函数, 保证切换面 ψ 附近控制输入的平滑连续性, 此处切换面厚度为 0.05, 进一步削弱抖振。

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s \geq \psi \\ \frac{s}{\psi} & |s| < \psi \\ -1 & s \leq -\psi \end{cases} \tag{12}$$

结合式(9) (11), 得到基于横向位移偏差的前轮转向角 δ_{f11} :

$$\begin{aligned}
\delta_{f11} &= -b_{22}^{-1} \left[(c_1 + a_{22}) \dot{e}_y + a_{23} e_\varphi + a_{24} \dot{e}_\varphi + \varepsilon_1 \operatorname{sgn} s_{11} + k_1 s_{11} \right] \\
&= -\frac{m}{2C_f} \left[\left(c_1 - \frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} \right) \dot{e}_y + \frac{2C_f + 2C_r}{m} e_\varphi + \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mv_x} \dot{e}_\varphi + \varepsilon_1 \operatorname{sat} s_{11} + k_1 s_{11} \right]
\end{aligned} \tag{13}$$

3.3. 航向角偏差控制

根据 SMC 条件, 同样对航向角偏差 e_φ 进行整理: 下式中 $B_{2(x)} \neq 0$, $d_{(x,t)}$ 表示外界干扰及不确定条件, 且满足 $d_{(x,t)} \leq D$ 条件。

$$\begin{aligned}
x_3 &= e_\varphi \\
\dot{x}_3 &= x_4 = \dot{e}_\varphi \\
\dot{x}_4 &= F_{2(x)} + B_{2(x)} u + d_{(x,t)}
\end{aligned} \tag{14}$$

角度偏差的消除较位移偏差更难, 因此采用非奇异终端滑模控制方法对 e_φ 进行修正, 如下为非奇异终端滑模面的设计, $c_2 > 0 (q > p)$, p 、 q 均为正数, 表达式不存在开关项, 动态性能更佳, 与线性滑模控制相比, 抖振程度有所改善, 与快速终端滑模相比, 能够解决奇异性问题。

$$\begin{aligned}
s_{12} &= x_4 + \frac{1}{c_2} x_3^{q/p} = \dot{e}_\varphi + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} e_\varphi^{\frac{q-1}{p}} \dot{e}_\varphi \\
&= a_{42} \dot{e}_y + a_{43} e_\varphi + \left(a_{44} + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} e_\varphi^{\frac{q-1}{p}} \right) \dot{e}_\varphi + b_2 \delta_{f12} \\
a_{42} &= -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{v_x I_z}; & a_{43} &= \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} \\
a_{44} &= -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{v_x I_z}; & b_2 &= \frac{2C_f l_f}{I_z}
\end{aligned} \tag{15}$$

同样采用指数趋近律 $\dot{s}_{12} = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn} s_{12} - k_2 s_{12}$, 进一步消除系统抖振, 得到基于 e_φ 的补偿前轮转角 δ_{f12} 如下:

$$\begin{aligned} \delta_{f12} &= -b_2^{-1} \left[a_{42} \dot{e}_y + a_{43} e_\varphi + \left(a_{44} + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} e_\varphi^{\frac{q-1}{p}} \right) \dot{e}_\varphi + \varepsilon_2 \operatorname{sgn} s_{12} + k_2 s_{12} \right] \\ &= -\frac{I_z}{2C_f l_f} \left[-\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{v_x I_z} \dot{e}_y + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} e_\varphi \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{v_x I_z} + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} e_\varphi^{\frac{q-1}{p}} \right) \dot{e}_\varphi + (D + \eta) \operatorname{sgn}(s_{12}) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

$1 < p/q < 2, \eta > 0$, 基于李雅普诺夫定理验证控制系统稳定性, 对式(14)求导:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{12} &= \dot{x}_3 + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} x_4^{\frac{q-1}{p}} \dot{x}_4 \\ &= x_4 + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} x_4^{\frac{q-1}{p}} \left(F_{2(x)} - F_{2(x)} - c_2 \frac{p}{q} x_4^{2-\frac{q}{p}} - (D + \eta) \operatorname{sgn}(s_{12}) + d_{(x,t)} \right) \\ &= \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} x_4^{\frac{q-1}{p}} \left(-(D + \eta) \operatorname{sgn}(s_{12}) + d_{(x,t)} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

公式(14)与(16)做乘积, 李雅普诺夫函数满足 $V = \frac{1}{2} s_{12}^2 \dot{V} = s_{12} \dot{s}_{12} = -\eta' |s_{12}| \leq 0$ 条件, 表示系统满足稳定性条件, 由于 $1 < p/q < 2$, 因此 $0 < q/p - 1 < 1$, 当 $x_4 \neq 0$ 时, $x_4^{\frac{q-1}{p}} > 0$,

$$\begin{aligned} s_{12} \dot{s}_{12} &= \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} x_4^{\frac{q-1}{p}} (-\eta |s_{12}|) = -\frac{1}{c_2} \frac{q}{p} x_4^{\frac{q-1}{p}} \eta |s_{12}| = -\eta' |s_{12}| \\ \eta' &= \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} x_4^{\frac{q-1}{p}} \eta > 0 \quad (x_4 \neq 0) \end{aligned} \quad (18)$$

根据快速终端滑模特点, 当 $t \rightarrow \infty, x \rightarrow 0$, 当 $x_4 \neq 0$ 时, $s_{12} = 0$ 可在有限时间内实现, 控制系统满足 Lyapunov 稳定条件。联合式子(8)和(14), 可分析出系统偏差趋近速度与滑模面关系, 当 $x_4 = 0$, 那么 $\dot{x}_4 = d_{(x,t)} - (D + \eta) \operatorname{sgn}(s_{12})$ 。当 $s_{12} > 0$, $\dot{x}_4 \leq -\eta$, 此时 x_4 迅速减小; 当 $s_{12} < 0$, $\dot{x}_4 \geq -\eta$, x_4 迅速增大。联立式子(14)与(16), 得到基于两大偏差 e_y 和 e_φ 的总修正前轮转角 δ_f , 反馈给车辆, 主动修正方向盘角度, 进而提高跟踪控制效率。

$$\begin{aligned} \delta_f &= \delta_{f11} + \delta_{f12} \\ &= -\frac{m}{2C_f} \left[\left(c_1 - \frac{2C_f + 2C_r}{mv_x} \right) \dot{e}_y + \frac{2C_f + 2C_r}{m} e_\varphi + \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{mv_x} \dot{e}_\varphi + \varepsilon_1 \operatorname{sat} s_{11} + k_1 s_{11} \right] \\ &\quad + -\frac{I_z}{2C_f l_f} \left[-\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{v_x I_z} \dot{e}_y + \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z} e_\varphi \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{v_x I_z} + \frac{1}{c_2} \frac{q}{p} e_\varphi^{\frac{q-1}{p}} \right) \dot{e}_\varphi + (D + \eta) \operatorname{sgn}(s_{12}) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

4. 仿真结果与分析

本文采用数学仿真工具 Matlab/Simulink 搭建轨迹跟踪控制器模型, 并与车辆动力学软件 CarSim 联合仿真, 对比双效跟踪策略与传统 Stanley 跟踪效果, 具体车辆模型参数如表 1 所示。选取常见的双移线轨迹进行跟踪效果验证, 行驶速度选 90 km/h 和 120 km/h, 从而验证跟踪策略在高速紧急工况下的跟踪能力, 地面附着系数 μ 取 0.8~1。

Table 1. Vehicle model parameters

表 1. 车辆模型参数

参数名称	数值
m(kg)	1270
C_f (N/rad)	69,050
C_r (N/rad)	40,125
l_f (m)	1.015
l_r (m)	1.895
I_z (kg·m ²)	1536.7

如图 3 为不同车速下的双移线轨迹的跟踪效果图, 红色为参考轨迹, 蓝色为双效跟踪策略效果, 可以看出不同车速下, 两种控制策略在前 100 m 的跟踪效果接近, 但在 100~150 m 和 250~350 m 两个紧急弯道处, Stanley 控制策略由于缺少偏差速率变化项, 因此在转向曲率、行驶速度较大时有明显的波动现象, 但双效控制策略的车辆模型恰好弥补这一缺陷, 且针对不同偏差采用了两种趋近律, 因此具备良好的跟踪效果和鲁棒性。

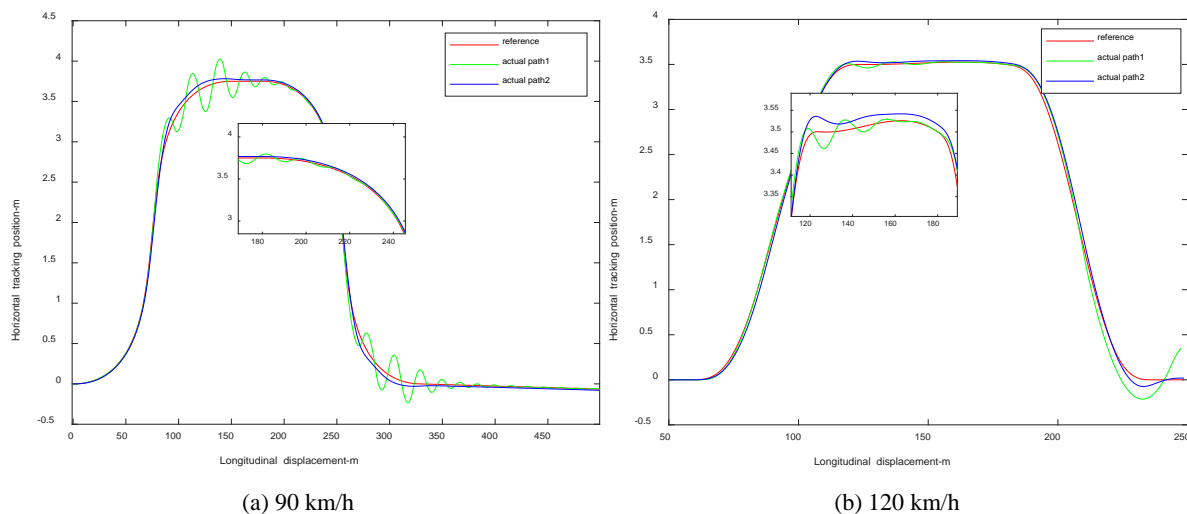


Figure 3. Trajectory tracking effect comparison chart

图 3. 轨迹跟踪效果对比图

如图 4 为实际行驶产生的横向位移偏差对比图, 可以更加直观地看出实际行驶与目标轨迹的偏差, 在 90 km/h 速度下, 双效控制策略的跟踪偏差最大在 0.1 m 左右, 而 Stanley 跟踪策略造成的横向位移偏差, 最大达到 0.3 m, 随着车速的提升, 120 km/h 车速下的跟踪误差对比效果更加明显, 此时双效跟踪策

略仍保持稳定的跟踪效果, 但 Stanley 方法的偏差在到达一定时间后失去控制效果, 可从曲线尾端明显看出。从曲线平滑程度上看出抖振削弱效果, 双效跟踪策略明显更优。

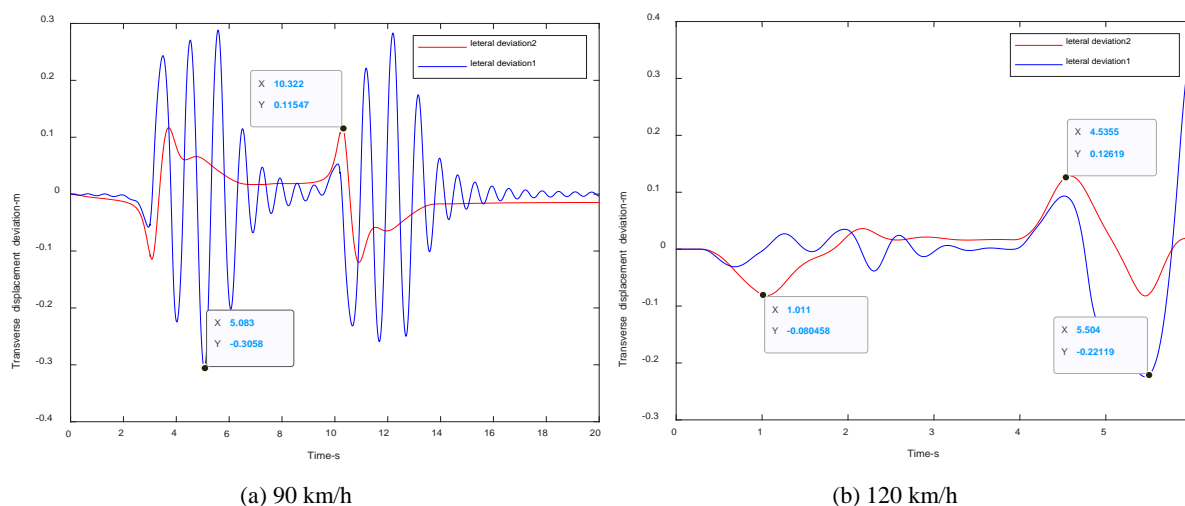


Figure 4. Transverse displacement deviation comparison chart

图 4. 横向位移偏差对比图

如图 5 为实际行驶车辆前轮转角对比图, 转向角度在转弯处有明显波动, 双效控制策略的反馈效果, 使得车辆转向所需转动角度控制在一定范围内, Stanley 跟踪策略得到的补偿转角不够, 造成转弯时波动较大, 方向盘来回旋转, 行驶稳定性降低, 随车速升高, 转向盘转角超出正常约束范围, 车辆失稳造成侧偏侧翻等危险情况。综合跟踪效果图、偏差图及前轮转角图可以看出, 所设计跟踪控制策略, 跟踪精度可提升 20%~50%左右, 且适用于急速转弯等复杂极限工况。

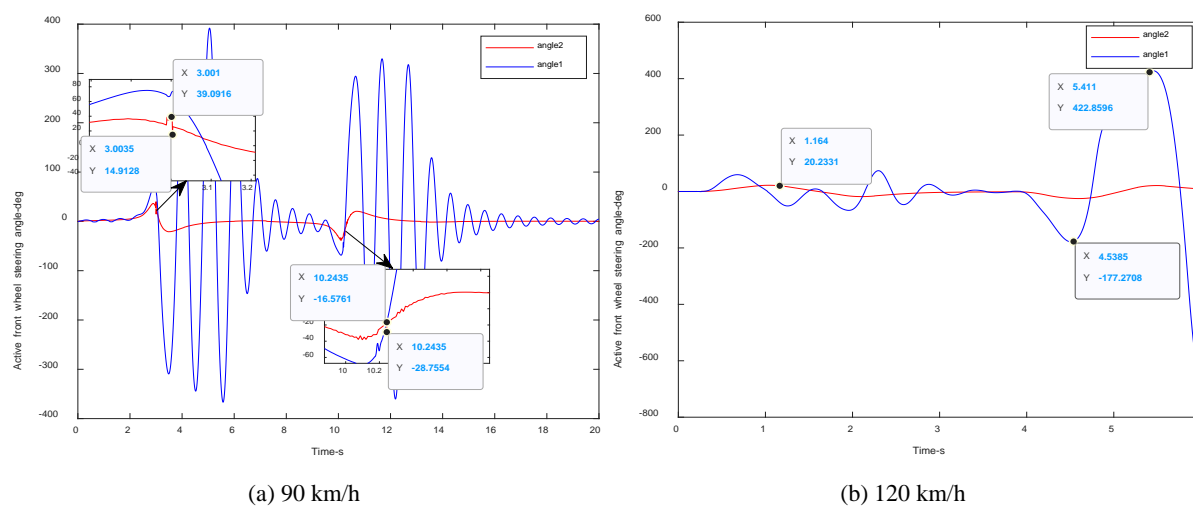


Figure 5. Active front wheel steering angle comparison chart

图 5. 主动前轮转向角对比图

5. 全文总结

本文设计了适用度较高的自动驾驶车辆轨迹跟踪控制策略。结合传统 Stanley 偏差与轨迹跟踪需求及

轮胎受力分析, 建立包含偏差变化率的三自由度车辆模型, 使得所设计控制策略适用范围更加广泛; 基于滑模变结构控制方法对横向位移偏差及航向角偏差进行约束计算, 使得控制系统稳定性明显提升; 得到车辆跟踪理想轨迹所需的前轮转向角, 再反馈给车辆进行补偿调节, 有效提高车辆轨迹跟踪精度; 且以上操作均保证控制系统在有限时间内收敛到滑模面。经对比仿真试验验证, 所设计跟踪策略在跟踪精度方面可提升 20%~50%, 同时控制系统鲁棒性得到明显提升。此方向的研究使得自动驾驶技术的发展向实践落实应用又迈进了一大步。

参考文献

- [1] Wang, Y., *et al.* (2021) Self-Learning Control for Coordinated Collision Avoidance of Automated Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, **235**, 1149-1163. <https://doi.org/10.1177/0954407019887884>
- [2] Hayashi, R., *et al.* (2012) Autonomous Collision Avoidance System by Combined Control of Steering and Braking Using Geometrically Optimised Vehicular Trajectory. *Vehicle System Dynamics*, **50**, 151-168. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.672748>
- [3] Rachael, J.A., Rault, A., Testud, J.L., *et al.* (1978) Model Predictive Heuristic Control: Application to an Industrial Process. *Automatica*, **14**, 413-428. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(78\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(78)90001-8)
- [4] Khooban, M.H., Vafamand, N. and Niknam, T. (2016) T-S Fuzzy Model Predictive Speed Control of Electrical Vehicles. *ISA Transactions*, **64**, 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.04.019>
- [5] Meshginqalam, A. and Bauman, J. (2020) Two-Level MPC Speed Profile Optimization of Autonomous Electric Vehicles Considering Detailed Internal and External Losses. *IEEE Access*, **8**, 206559-206570. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038050>
- [6] Li, S., Li, Z., Yu, Z., Zhang, B. and Zhang, N. (2019) Dynamic Trajectory Planning and Tracking for Autonomous Vehicle with Obstacle Avoidance Based on Model Predictive Control. *IEEE Access*, **7**, 132074-132086. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940758>
- [7] Zhang, C., Chu, D., Liu, S., Deng, Z., Wu, C. and Su, X. (2019) Trajectory Planning and Tracking for Autonomous Vehicle Based on State Lattice and Model Predictive Control. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, **11**, 29-40. <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2903536>
- [8] Song, J. (2016) Active Front Wheel Steering Model and Controller for Integrated Dynamics Control Systems. *International Journal of Automotive Technology*, **17**, 265-272. <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0026-9>
- [9] Yuan, H., Sun, X. and Gordon, T. (2019) Unified Decision-Making and Control for Highway Collision Avoidance Using Active Front Steer and Individual Wheel Torque Control. *Vehicle System Dynamics*, **57**, 1188-1205. <https://doi.org/10.1080/00423114.2018.1535125>
- [10] 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.
- [11] Tang, Q., Li, Y., Guo, R., Jin, D., Hong, Y. and Huang, H. (2021) Chattering-Suppression Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle Based on Nonlinear Disturbance Observer and Power Function Reaching Law. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, **43**, 2081-2093. <https://doi.org/10.1177/0142331221989867>
- [12] Elmokadem, T., Zribi, M. and Youcef-Toumi, K. (2016) Trajectory Tracking Sliding Mode Control of Underactuated AUVs. *Nonlinear Dynamics*, **84**, 1079-1091. <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2551-x>
- [13] Hu, C., Wang, R. and Yan, F. (2016) Integral Sliding Mode-Based Composite Nonlinear Feedback Control for Path Following of Four-Wheel Independently Actuated Autonomous Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **2**, 221-230. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2537046>
- [14] Chen, D., *et al.* (2022) Output Feedback Sliding Mode Control for Path-Tracking of Autonomous Agricultural Vehicles. *Nonlinear Dynamics*, **110**, 2429-2445. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07739-2>
- [15] Ren, D., Zhang, J., Zhang, J. and Cui, S. (2011) Trajectory Planning and Yaw Rate Tracking Control for Lane Changing of Intelligent Vehicle on Curved Road. *Science China Technological Sciences*, **54**, 630-642. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4227-6>
- [16] Chen, T., Cai, Y., Chen, L., Xu, X. and Sun, X. (2021) Trajectory Tracking Control of Steer-by-Wire Autonomous Ground Vehicle Considering the Complete Failure of Vehicle Steering Motor. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **109**, Article ID: 102235. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102235>
- [17] Ahn, T., Lee, Y. and Park, K. (2021) Design of Integrated Autonomous Driving Control System That Incorporates Chassis Controllers for Improving Path Tracking Performance and Vehicle Stability. *Electronics*, **10**, 144. <https://doi.org/10.3390/electronics10020144>

-
- [18] Sun, T., Guo, H., Cao, J.Y., Chai, L.J. and Sun, Y.D. (2013) Study on Integrated Control of Active Front Steering and Direct Yaw Moment Based on Vehicle Lateral Velocity Estimation. *Mathematical Problems in Engineering*, **2013**, Article ID: 275269. <https://doi.org/10.1155/2013/275269>
- [19] Nam, K., Oh, S., Fujimoto, H. and Hori, Y. (2012) Robust Yaw Stability Control for Electric Vehicles Based on Active Front Steering Control through a Steer-by-Wire System. *International Journal of Automotive Technology*, **13**, 1169-1176. <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0120-6>
- [20] 王鑫, 凌铭, 饶启鹏, 刘畅, 翟树龙. 基于改进 Stanley 算法的无人车路径跟踪融合算法研究[J]. 汽车技术, 2022(7): 25-31. <https://doi.org/10.19620/j.cnki.1000-3703.20220201>