



# Research on Synovial Membrane Control Trajectory Tracking Based on Front-Wheel Steering

Liqiu Yuan

College of Automotive and Transportation, Xihua University, Chengdu, China  
Email: yeyingpan2023@163.com

**How to cite this paper:** Yuan, L.Q. (2025) Research on Synovial Membrane Control Trajectory Tracking Based on Front-Wheel Steering. *Open Access Library Journal*, 12: e13807.

<https://doi.org/10.4236/oalib.1113807>

**Received:** June 20, 2025

**Accepted:** June 29, 2025

**Published:** July 2, 2025

Copyright © 2025 by author(s) and Open Access Library 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

## Abstract

In order to improve the practicability and control accuracy of the trajectory tracking control algorithm and solve the problem of insufficient tracking accuracy of the target path during vehicle driving, a trajectory tracking controller based on sliding film predictive control is designed. Firstly, a two-degree-of-freedom vehicle model was established, taking into account the vehicle's steering characteristics; Then, a sliding mode controller was designed. By choosing the appropriate sliding mode surface and control law, the vehicle was able to track the desired trajectory quickly and accurately. Finally, through the joint simulation of MATLAB/Simulink and CarSim, the sliding mode control designed in this paper is compared with the classic PID control, and the trajectory tracking controller designed in this paper is analyzed. The results show that the trajectory tracking error of sliding mode control is small and it has a good effect on the control of vehicle body stability.

## Subject Areas

Transportation Engineering

## Keywords

Trajectory Tracking, Sliding Mode Control, Two-Degree-of-Freedom Vehicle Model

## 1. 引言

随着科技的飞速发展和人们对出行安全、效率与舒适性要求的不断提高，自动驾驶技术逐渐成为研究的热点和前沿方向。智能车的概念最早是被英美等国家提出来，其发展与应用一直被密切关注，而轨迹跟踪是智能车发展的关



将(6)式进行简化, 得到二自由度车辆模型动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \left( \frac{k_1 + k_2}{mv_x} \right) \beta + \left( \frac{k_1 l_f - k_2 l_r}{mv_x^2} - 1 \right) \omega_r - \frac{k_1}{mv_x} \theta_{fw} - \frac{k_2}{mv_x} \theta_{rw} \\ \dot{\omega}_r = \left( \frac{k_1 l_f - k_2 l_r}{I_z} \right) \beta + \left( \frac{k_1 l_f^2 + k_2 l_r^2}{I_z v_x} \right) \omega_r - \frac{k_1 l_f}{I_z} \theta_{fw} - \frac{k_2 l_r}{I_z} \theta_{rw} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $k_1$  为前轮的轮胎侧偏刚度,  $k_2$  为后轮的轮胎侧偏刚度。

取状态变量为  $X = [\beta \ \omega_r]^T$ , 输出变量为  $Y = [\beta \ \omega_r]^T$ , 结合式(7)可得状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_1 U + B_2 W \\ Y = CX \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_2}{mv_x} & \frac{k_1 l_f - k_2 l_r}{mv_x^2} - 1 \\ \frac{k_1 l_f - k_2 l_r}{I_z} & \frac{k_1 l_f^2 + k_2 l_r^2}{I_z v_x} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{mv_x} & -\frac{k_1 l_f}{I_z} \end{bmatrix}^T, \quad U = [\theta_{fw}],$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -\frac{k_2}{mv_x} & -\frac{k_2 l_r}{I_z} \end{bmatrix}^T, \quad W = [\theta_{rw}], \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

### 3. 车辆转向的理想状态

车辆转向的理想状态是车辆能够精确地按照预设轨迹行驶, 同时保持稳定的姿态和良好的操控性[3]。在转向过程中, 车辆应具备快速且线性的响应特性, 避免出现侧滑、甩尾或不必要的轮胎磨损。此外, 车辆应适应不同路况和速度, 确保在各种条件下都能保持动态稳定性, 提供舒适的乘坐体验。

本文将质心侧偏角的理想值设置为零, 以更好地控制车辆运动姿态, 并从前轮转向角、车速等车辆参数中得出横摆角速度的理想值[4]。同时, 由于车辆的最大横向加速度受轮胎与地面摩擦系数  $\mu$  的限制, 因此还应满足横摆角速度的理想值:  $\omega_r \leq 0.85\mu x/v_x$ , 质心侧偏角和横摆角速度的理想值表示为[5]:

$$\begin{cases} \beta_d = 0 \\ \omega_{rd} = \min \left( \left| \frac{v_x \theta_{fw}}{L(1 + Kv_x^2)} \right|, \left| \frac{0.85\mu x}{v_x} \right| \right) \text{sgn}(\theta_{fw}) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $L = l_f + l_r$ ,  $K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{l_f}{k_2} - \frac{l_r}{k_1} \right)$ , 单位  $\text{s}^2/\text{m}^2$ 。

## 4. 前轮转向控制器设计

### 4.1. 滑模控制器设计

SMC 控制是一种重要的非线性控制策略, 它的一个重要作用是可以实现系统状态的自我调节。要实现该控制方法首先需要进行滑模面的设计, 这里

需要保证滑动模态的渐近稳定性。其次需要特别关注可能存在的抖振现象，可能需要结合其他的方法进行抑制。该控制方法不仅算法简洁，而且响应速度快，在众多场合有广泛的应用[6]。

由于 SMC 算法具有良好的瞬态响应特性和鲁棒性的特点，以及系统自身对参数变化和对外界干扰抵抗能力强，本文采用 SMC 算法控制前轮转向角，实现横摆角速度和质心侧偏角的跟踪控制，从而达到提高车辆稳定性和主动安全性的目的，其控制策略的结构框图如图 2 所示。

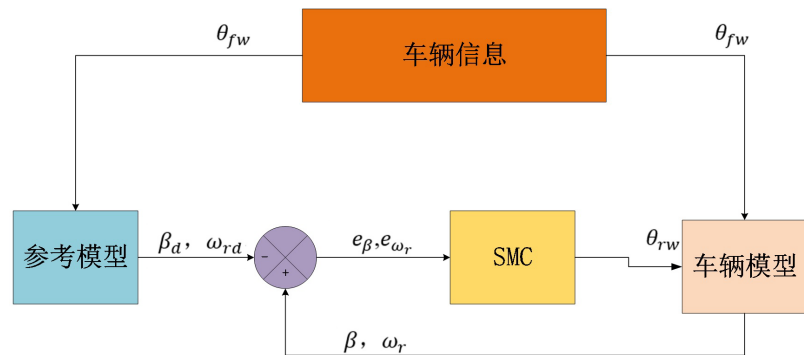


图 2. 控制策略结构图

参考模型输出向量定义为：

$$X_d = [\beta_d \quad \omega_{rd}]^T \quad (5)$$

本文将系统误差作为滑模变结构控制的滑膜面，即：

$$S = X - X_d \quad (6)$$

结合式(3)，对(6)式求导得：

$$\dot{S} = AX + B_1U + B_2W - \dot{X}_d \quad (7)$$

同时，为了使系统快速地滑向滑膜面  $S$ ，设计滑结构的趋近率为：

$$\dot{S}_d = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - KS \quad (8)$$

其中， $\varepsilon > 0$ ， $K > 0$ 。对 SMC 进行李雅普诺夫稳定性验证，将  $v_0 = \frac{1}{2}s^2$  作为 Lyapunov 函数，对其求导得：

$$\dot{v}_0 = s\dot{s} = s(-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks) < 0 \quad (9)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论，所设计的系统是渐进稳定的，在一定时间内滑膜面收敛至原点。

结合式(7)和式(8)可以得到滑模控制率  $U$ ，即前轮转向角：

$$U = \frac{-\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - KS - AX + B_2W + \dot{X}_d}{B_1} \quad (10)$$

参数  $\varepsilon$  与  $k$  对系统收敛性影响较大，通常增大  $k$  与减小  $\varepsilon$  可以使系统状

态点趋近滑模面的运动速度变快，状态点将会更快地到达滑模区，控制系统的响应速度变快。

## 4.2. 仿真分析

本文采用采用 MATLAB/Simulink 与 CarSim 联合仿真。Carsim 是由 MSC Software 公司开发的一款专注于车辆动力学仿真的专业软件。该软件的特点在于它通过图形用户界面来配置汽车的各种参数，并且在后台进行精确的数学建模和仿真计算，能够实时地反映出这些参数变化对车辆性能的影响[7]。在 Simulink 中按上述模型搭建好仿真模型，车辆模型选用 Carsim 中的 C 级车，将 Carsim 中的输入设置为前轮转向角，仿真中相关参数如表 1 所示。

表 1. 仿真相关参数

参数名称	参数符号	单位	数值
质心到前轴距离	$l_f$	m	1.015
轴距	$l$	m	2.910
质心到后轴距离	$l_r$	m	1.895
簧载质量	$m$	kg	1270
绕 Z 轴转动惯量	$I_z$	kg·m <sup>2</sup>	1536.7
前轮侧偏刚度	$k_1$	N·m/rad	39,000
后轮侧偏刚度	$k_2$	N·m/rad	44,118

搭建好模型后，在 Carsim 中将仿真道路设置为附着系数为 0.85 的双移线工况，车速分别选择 30 km/h 和 80 km/h，并与经典的 PID 控制仿真进行对比，仿真结果如图 3~6 所示。

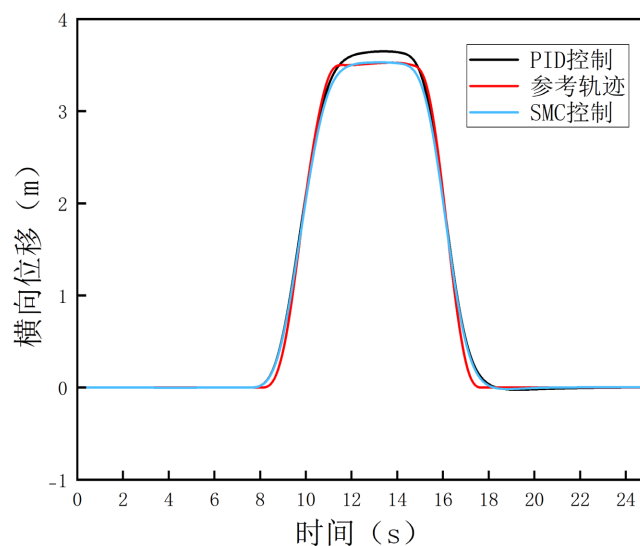


图 3. 30 km/h 轨迹分析图

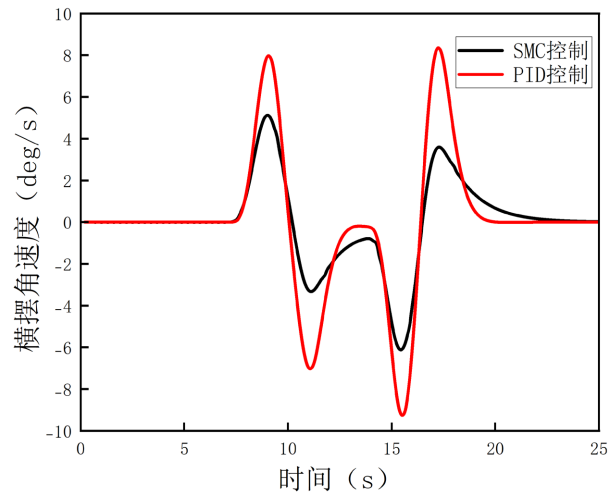


图 4. 30 km/h 横摆角速度图

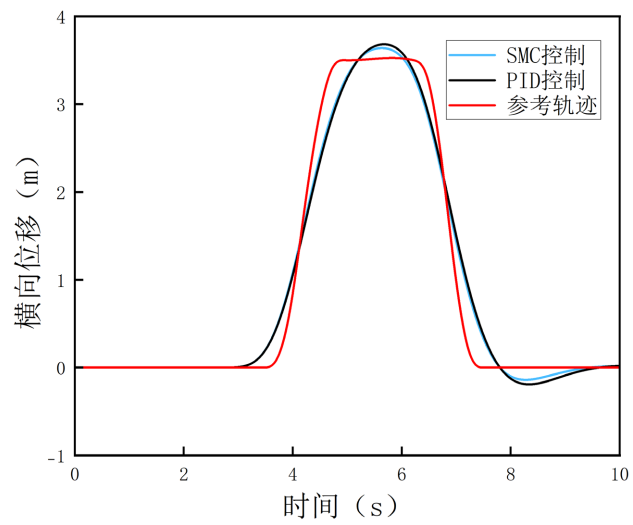


图 5. 80 km/h 轨迹分析图

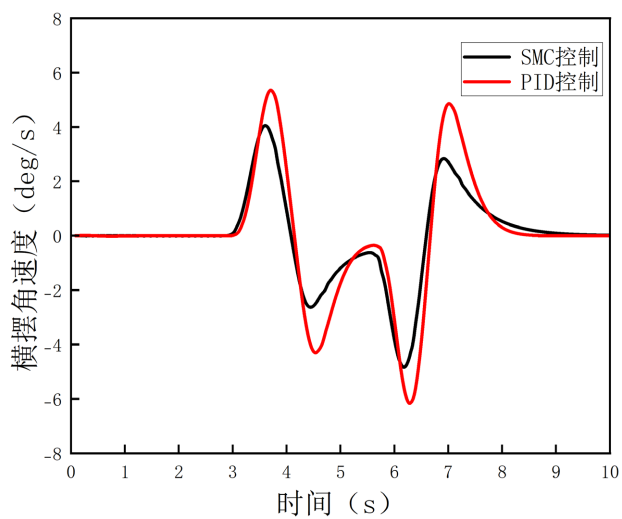


图 6. 80 km/h 横摆角速度图

从图 3、图 4 可以看出, 车辆在低速工况下, SMC 控制的车辆行驶轨迹与参考轨迹几乎吻合, SMC 控制和 PID 控制的车辆轨迹横向位移最大误差分别为 0.071 m 和 0.133 m, 跟踪误差降低了 46.6%, SMC 控制器的跟踪效果更好; SMC 控制的横摆角速度变化比 PID 控制的横摆角速度变化小, 车辆更稳定; 从图 5、图 6 可以看出, 车辆在高速工况下, PID 控制和 SMC 控制器的车辆轨迹横向位移偏差最大值分别为 0.476 m 和 0.385 m, 跟踪误差降低了 19.1%, SMC 控制的行驶轨迹更接近参考轨迹, 车辆的操纵稳定性更好。SMC 控制器在低速、高速工况下均能减小跟踪误差, 提升跟踪精度, 且横摆角速度波动更小, 车辆稳定性更好。

## 5. 结论

本文基于二自由度车辆模型采用 SMC 控制对前轮转角进行控制, 从而实现轨迹跟踪; 联合 Simulink 与 Carsim 仿真, 仿真结果表明, 在 30 km/h 的低速双移线工况下, SMC 控制轨迹变化与参考轨迹变化趋势基本一致, 并且 SMC 控制的轨迹更贴近参考轨迹, 在 80 km/h 的高速双移线工况下, PID 控制的轨迹与 SMC 控制的轨迹差别较小, 但 SMC 控制的横摆角速度变化更小, 车辆更稳定。SMC 控制的轨迹跟踪效果更优于经典的 PID 控制, 车辆的稳定性更好。

## Conflicts of Interest

The author declares no conflicts of interest.

## References

- [1] 罗统, 张民, 梁承宇. 复杂环境下多无人机协同目标跟踪路径规划[J]. 兵工自动化, 2024, 43(9): 90-96.
- [2] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] Zhang, L., Meng, Q., Chen, H., Huang, Y., Liu, Y. and Guo, K. (2021) Kalman Filter-Based Fusion Estimation Method of Steering Feedback Torque for Steer-By-Wire Systems. *Automotive Innovation*, 4, 430-439. <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00159-9>
- [4] 丁炳超, 王立勇, 苏清华, 等. 基于自适应反馈的 MPC 车辆轨迹跟踪控制算法[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(12): 150-154.
- [5] Zhang, C., Gao, P., Wang, J., Dang, M., Yang, X. and Feng, Y. (2023) Research on Active Rear-Wheel Steering Control Method with Sliding Mode Control Optimized by Model Predictive. *IEEE Access*, 11, 57228-57239. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3283330>
- [6] 方震宇, 肖平, 杨东德. 基于麻雀算法和滑模控制的路感模拟研究[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2024, 26(6): 98-104.
- [7] 邹俊逸, 聂朝航, 许小伟, 等. 车道偏离预警系统的 Carsim/Simulink 联合仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2025(4): 169-172, 177.

## Appendix (Abstract and Keywords in Chinese)

### 基于前轮转向的滑膜控制轨迹跟踪研究

**摘要:** 为了提高轨迹跟踪控制算法的实用性和控制精度, 解决车辆在行驶过程中对目标路径跟踪精度不足的问题, 设计了一种基于滑膜控制的轨迹跟踪控制器。首先建立二自由度车辆模型, 考虑了车辆转向特性; 然后设计了滑膜控制器, 通过选择合适的滑模面和控制律, 使车辆能够快速且准确地跟踪期望轨迹; 最后采用 MATLAB/Simulink 与 CarSim 的联合仿真, 将本文设计滑膜控制控制与经典的 PID 控制进行对比, 分析本文设计的轨迹跟踪控制器。结果表明, 滑膜控制的轨迹跟踪误差小, 在车身稳定性控制方面效果良好。

**关键词:** 轨迹跟踪, 滑模控制, 二自由度车辆模型