

Research on Vehicle Active Steering Control Based on Steering-by-wire System

Subtitle as Needed

Keqi Zhang

College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: Based on the CarSim/MATLAB co-simulation, an improved vehicle model was established using a steer-by-wire steering dynamics model instead of the steering system of the CarSim original vehicle model. Based on the advantage that the angle-to-gear ratio of the steer-by-wire steering system can be freely designed, the ideal angle-varying transmission ratio of the steer-by-wire steering system is designed based on the constant yaw rate gain. Aiming at the nonlinear characteristics of the vehicle steering system, the active steering controller of the steer-by-wire system was designed using fuzzy control theory. Finally, using the improved vehicle, the controller was simulated and analyzed. The results show that the active steering controller designed by the fuzzy control theory improves the vehicle's steering stability.

Keywords: Steer-by-wire; Variable angle gear ratio; Fuzzy control; Steering stability

基于线控转向系统的车辆主动转向控制研究

张可启

重庆交通大学, 机械与车辆工程学院, 重庆, 中国, 400074

957547015@qq.com

摘要: 基于 CarSim/MATLAB 联合仿真, 使用线控转向动力学模型代替 CarSim 原车辆模型的转向系统建立改进车辆模型。基于线控转向系统角传动比可以自由设计的优势, 根据横摆角速度增益不变设计了线控转向系统理想变角传动比。针对车辆转向系统非线性的特点, 利用模糊控制理论设计了线控转向系统主动转向控制器。最后使用改进车辆对所研究控制器进行了仿真分析, 结果表明: 利用模糊控制理论设计的主动转向控制器提高了车辆的操纵稳定性。

关键词: 线控转向; 变角传动比; 模糊控制; 操纵稳定性

1 引言

车辆主动转向系统能够根据车辆实时状态反馈, 在车辆发生危险工况时通过主动附加前轮转角来产生补偿横摆力矩, 在不破坏驾驶员驾驶感受的情况下使车辆恢复稳定行驶状态。目前, 国内外专家学者对于主动转向进行了以下研究: Manhtuan 等^[1]采用鲁棒滑模学习控制算法提高车辆转向的稳定性; Koroglu 等^[2]研究系统多性能目标的静态输出反馈控制的 LMI 条件; 王金湘等^[3]提出基于静态输出反馈的 AFS 鲁棒控制器, 以提高汽车横摆角速度跟踪和侧向稳定性控制性能; 周兵等^[4]考虑参数不确定性提出了协调主动横向稳定杆与 AFS 的模糊 PID 控制器用来提高车辆转向时的侧倾与横摆稳定性; 武健^[5]采用一种考虑模型不确定性和扰动的正则左互质分解的车辆模型来设计

主动转向控制器。

本文不考虑方向盘模块, 以方向盘转角作为线控转向系统执行机构的输入, 以此来简化控制结构。使用模糊控制原理进行主动转向控制器设计, 以此进行线控转向车辆主动转向控制研究。

2 基于线控转向系统的整车模型

转向执行系统主要由齿轮齿条机构、转向组件以及转向执行组件等构成。

齿轮齿条机构的系统动力学方程为:

$$M_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r + F_z = K_f G_{mf} (q_{mf} - G_{mf} x_r / r_p) / r_p \quad (1)$$

转向组件动力学方程为:

$$F_z = \frac{T_k}{G_l} + \frac{T_r}{G_r} \quad (2)$$

式中, M_r —齿条质量; B_r —齿条阻尼系数;

F_z —左右车轮传递到齿条的转向阻力的和； K_f —转向执行电机轴的扭转刚度； G_{mf} —转向执行电机减速器的减速比； q_{mf} —转向执行电机转角； r_p —转向器小齿轮分度圆半径； T_{lz} 、 T_{rz} —左、右车轮回正力矩； G_l 、 G_r —左前轮、右前轮转向摇臂长度。

转向执行组件动力学模型：

$$T_{mf} = J_{mf} \ddot{q}_{mf} + B_{mf} \dot{q}_{mf} + K_f (q_{mf} - G_{mf} x_r / r_p) \quad (3)$$

转向执行电机数学模型：

$$U_{mf} = R_{mf} i_{mf} + L_{mf} \dot{i}_{mf} + K_{mf} \dot{q}_{mf} \quad (4)$$

转向执行电机电磁转矩与电流的关系为：

$$T_{mf} = K_{if} i_{mf} \quad (5)$$

式中， T_{mf} —转向执行电机电磁转矩； J_{mf} —转向执行电机的转动惯量； B_{mf} —转向执行电机的阻尼系数； U_{mf} —转向执行电机两端电压； R_{mf} —转向执行电机两端电阻； i_{mf} —转向执行电机电流； L_{mf} —转向执行电机电感； K_{mf} —转向执行电机反电动势系数； K_{if} —转向执行电机的电磁转矩系数。

本文选取 CarSim 软件自带的 B 级轿车为研究对象，车辆主要参数如表 1 所示。CarSim 原车辆模型中的转向系统为“无助力机械式齿轮齿条转向器”，制动和悬架系统均为软件默认值，轮胎模型选择的是 CarSim 自带的 Pacejka5.2Model 轮胎模型，即“魔术公式”轮胎模型。轮胎型号为“185/65 R15”。

通过设置 OPT_STEER_EXT=0 来关闭 CarSim 车辆模型中的转向部分。使用 MATLAB/Simulink 建立的线控转向系统仿真模型代替其原有的无助力机械式齿轮齿条转向器，建立装备有线控转向系统的改进车辆模型，如图 1 所示。

Table 1. CarSim vehicle model part parameters

表 1. CarSim 整车模型部分参数

参数名称	数值
车辆质量 m	1110kg
轴距 L	2.60m
质心到前轴距离 a	1.04m
质心到后轴距离 b	1.56m
绕 X 轴转动惯量 Ixx	440.6kg.m ²
绕 Y 轴转动惯量 Iyy	1341.1kg.m ²
绕 Z 轴转动惯量 Izz	1341.1kg.m ²
前轮侧偏刚度 k1	18903.40N/rad

后轮侧偏刚度 k2	11276.48N/rad
前轮轮距 Bf	1480mm
后轮轮距 Br	1475mm
质心高度 h	540mm

3 变角传动比研究

线控转向系统基于转向增益不变的变角传动比设计思路是：根据上述理想角传动比的思想，设计线控转向系统的变角传动比，让汽车能够保持转向增益不随车速的改变而改变。横摆角速度体现了汽车转向时的路径跟踪能力，横摆角速度增益（即转向灵敏度）则体现了汽车转向时是否轻便易操作。本文选择基于横摆角速度增益不变进行线控转向系统变角传动比设计。

理想二自由度车辆模型的系统动力学方程为：

$$\begin{cases} (k_1 + k_2) b + \frac{w_r}{v_x} (ak_1 - bk_2) - k_1 d_f = m v_x (b + w_r) \\ (ak_1 - bk_2) b + \frac{w_r}{v_x} (a^2 k_1 + b^2 k_2) - ak_1 d_f = I_z w_r \end{cases} \quad (6)$$

式中， a 、 b —分别为汽车前、后轴到质心的距离； k_1 、 k_2 —分别为两前轮、后轮侧偏刚度之和； m —质量； v_x —汽车在 X 轴上的质心速度分量； d_f —前轮转角； b —质心侧偏角； w_r —横摆角速度； I_z —汽车绕 Z 轴的转动惯量。

车辆横摆角速度增益为车辆横摆角速度响应与输入方向盘转角的比值，记为 G_h 。则 $G_h = w_r / d_h$ 。带入车辆二自由度模型可得到车辆的横摆角速度增益 G_h ：

$$G_h = \frac{v_x / L}{1 + \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right) v_x^2} \quad (7)$$

假设车辆稳态横摆角速度增益值不变，则 G_h 为常量，即 $G_h = w_r / d_h = K_w$ 。将系统总传动比 $i = d_h / d_f$ 带入式(7)可以得到基于横摆角速度增益不变的理想变角传动比 i_{wr} ：

假设车辆稳态横摆角速度增益值不变，则 G_h 为常量，即 $G_h = w_r / d_h = K_w$ 。将系统总传动比 $i = d_h / d_f$ 带入式(7)可以得到基于横摆角速度增益不变的理想变角传动比 i_{wr} ：

$$i_{w_r} = \frac{v_x/L}{\left[1 + \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1}\right) v_x^2\right]} K_w \quad (8)$$

由文献^[6]得 K_w 可取 0.20，由此可以得出横摆角速度增益不变时的理想传动比随车速变化曲线如图 2 所示。

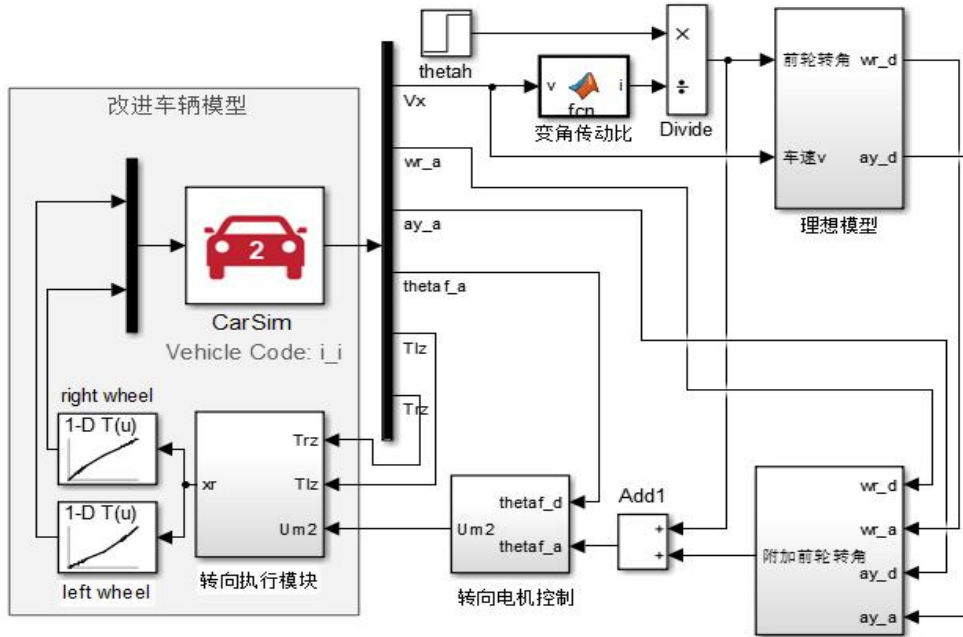


Figure 1. Steer-by-wire vehicle model
图 1. 线控转向车辆模型

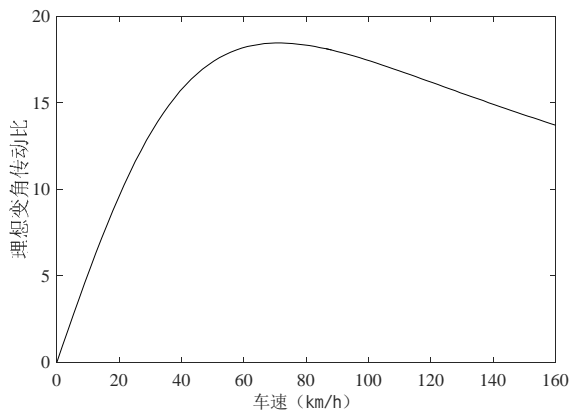


Figure 2. The Characteristic of the Variable Velocity Ratio Transmission Ratio with Vehicle Speed
图 2. 理想变角传动比随车速变化特性

外附加前轮转角 Δd_f 为输出。模糊控制器控制规则表如表 2 所示。

Table 2. Fuzzy inference rules
表 2. 模糊推理规则

$\frac{e}{ec}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NVL	NVL	NL	NM	NS	ZE	ZE
NM	NVL	NL	NM	NS	ZE	ZE	PS
NS	NL	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PL
PM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PL	PVL
PL	ZE	ZE	PS	PM	PL	PVL	PVL

4 主动转向控制策略

本文基于车辆横摆角速度反馈设计了模糊主动转向控制器，以期望横摆角速度与实际横摆角速度的误差 $e(w_r)$ 和误差变化率 $e(\dot{w}_r)$ 作为控制器的输入，以额

5 仿真分析

在车速为 80km/h，路面附着系数为 0.5 的双移线工况下进行仿真。仿真实验结果如图 3、图 4。

由图 3 和图 4 可以看出低附着系数路面下，无控制车辆的横摆角速度响应和质心侧偏角幅值较大，车辆的操纵稳定性较差。模糊主动控制车辆的横摆角速度和质心侧偏角响应幅值较无控制车辆有所改善，车辆的操纵稳定性得到一定的改善。

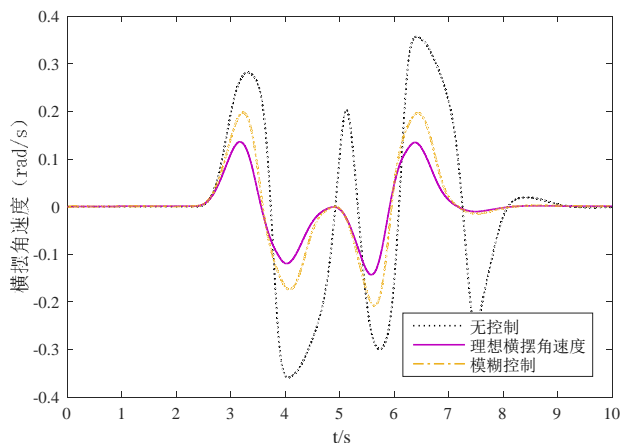


Figure 3. Dual-line-shift yaw rate response

图 3. 双移线工况横摆角速度响应

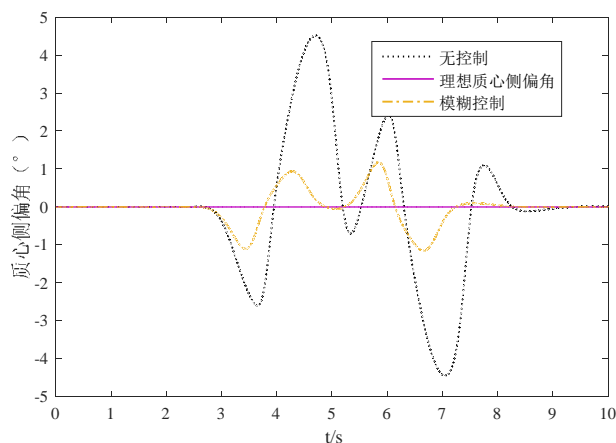


Figure 4. Double shift line condition centroid side angle

图 4. 双移线工况质心侧偏角

6 结论

使用线控转向动力学模型代替 CarSim 原车辆模型的转向系统建立了改进车辆模型。基于横摆角速度增益不变得出了线控转向系统变角传动比。利用模糊控制理论设计了主动转向控制器并对所设计控制器进行了验证，结果表明：所设计主动转向控制器能较好的改善车辆的操纵稳定性。

References (参考文献)

- [1] MANHTUAN D,MAN Z,ZHANG C,et al.Robust Sliding Mode Learning Control for Uncertain Discrete-time Multi-in-put Multi-output System[J].Let Control Theory & Applications,2014,8(12):1045-1053.
- [2] KOROGLU H,FALCONE P.New LMI Conditions for Static Output Feedback Synthesis with Multiple Performance Objectives[C]//IEEE.IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control.NEW York:IEEE,2015:866-871.
- [3] 王金湘, 代蒙蒙, 陈南.考虑参数不确定性的汽车前轮主动转向输出反馈鲁棒控制[J].东南大学学报, 2016, 46(3): 476-482.
- [4] 周兵, 颜丙超, 吕绪宁.考虑不确定性的基于主动横向稳定杆和 AFS 的车辆稳定性协调控制[J].振动与冲击, 2015, 34(18): 111-117.
- [5] 武键.汽车状态和参数估计与稳定性集成控制方法研究[D].南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [6] 田杰. 汽车线控转向系统动力学分析与控制方法研究[D]. 江苏大学, 2011.