

基于转速参考模型的线控转向主动回正控制

刘书翰¹, 吴晓东^{1,2}, 梁登宇³, 高森祺³, 黄刚³

(1. 上海交通大学 智能汽车研究所, 上海 200240; 2. 上海交通大学 重庆研究院, 重庆 401135;
3. 博世华域转向系统有限公司, 上海 201821)

摘要: 为解决传统主动回正控制中各车速下合适的回正转速难以确定的问题, 提出了一种基于回正转速参考模型和滑模控制的线控转向系统主动回正控制方法。设计了基于时间窗的主动回正状态判断机制, 根据轮胎回正力矩建立了回正转速参考模型, 并基于此模型设计了主动回正滑模控制策略。硬件在环仿真试验结果表明, 提出的主动回正状态判断机制能准确切换系统状态, 回正转速参考模型真实性高, 且滑模控制策略能有效保障转向盘对参考回正转速的跟踪效果。

关键词: 线控转向; 主动回正控制; 滑模控制; 主动回正状态判断机制

中图分类号: U463.4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.01.11

Active Return-to-Center Control for Steer-by-Wire Systems Based on a Steering Wheel Angular Speed Reference Model

LIU Shuhan¹, WU Xiaodong^{1,2}, LIANG Dengyu³, GAO Senqi³, HUANG Gang³

(1. Institute of Intelligent Vehicle, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Chongqing Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Chongqing 401135, China;
3. Bosch HUAYU Steering Systems Co., Ltd., Shanghai 201821, China)

Abstract: To address the difficulty in determining the optimal return angular speed at various vehicle speeds in traditional active Return-to-Center (RTC) control, a new active RTC control method for steer-by-wire systems is proposed, combining a return speed reference model and sliding mode control. A time-window-based mechanism for determining the active return-to-center state is designed. The return speed reference model is established based on the tire aligning torque, and an active RTC sliding mode control strategy is developed accordingly. Hardware-in-the-loop simulation results indicate that the proposed active return state determination mechanism can accurately switch system states, the return speed reference model exhibits high accuracy, and the sliding mode control strategy effectively ensures that the steering wheel reliably follows the reference return speed.

Keywords: steer-by-wire; active return-to-center control; sliding mode control; return-to-center state judgment mechanism

收稿日期: 2024-10-10 改稿日期: 2024-11-25 网络首发日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(NSFC:52472413);

重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2024NSCQ-MSX0711)

参考文献引用格式:

刘书翰, 吴晓东, 梁登宇, 等. 基于转速参考模型的线控转向主动回正控制[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(1): 108-115.

LIU Shuhan, WU Xiaodong, LIANG Dengyu, et al. Active Return-to-Center Control for Steer-by-Wire Systems Based on a Steering Wheel Angular Speed Reference Model[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(1): 108-115. (in Chinese)



随着汽车技术的迅猛发展，线控转向技术作为驾驶操控领域的一项先进技术逐渐崭露头角。与传统的机械转向系统相比，线控转向系统取消了转向盘与转向车轮之间的机械连接，引入了路感电机和转向电机，由电信号实现指令传递从而操纵汽车的转向。其灵活的控制方式和快速精确的响应特性，高度符合现代汽车电动化、智能化的发展需求。由于转向车轮与转向盘的机械连接被切断，转向车轮所受到的回正力矩无法通过传动机构传递至转向盘，这导致在驾驶员停止转向操作后，转向盘不会自动回正至中位，增加了驾驶员的回正负担。

为使转向盘能在驾驶员脱手后回正至中位，国内外学者提出了一些主动回正方法。李绍松等^[1]通过估计折算到转向小齿轮上的轮胎回正力矩进行主动回正控制，减小了低车速下转向盘的回正残留角度，并降低了高车速下车辆的回正横摆角速度超调量，改善了车辆的回正性能。吴立群等^[2]通过卡尔曼滤波方法估计助力电机角度状态，得到转向管柱受到的回正力矩，并采用积分滑模控制助力电机跟踪回正力矩，有效提高了转向盘的回正响应时间。DU Panpan等^[3]设计了一种主动回正状态判断机制和一种状态逻辑切换算法，确保了主动回正状态判断的准确性以及助力状态和主动回正状态之间切换的平滑性。侯训波等^[4]对根据转向盘起始回正转角和车速匹配设计的目标回正角速度，进行实时跟踪控制，使车辆在各种工况下都有良好的回正性能，但对不同的车型进行标定工作量繁重。WU Yangfei等^[5]设计了一种基于单神经元自适应PID控制的平滑角速度主动回正控制策略，能应对主动回正过程中的参数不确定性，在不影响基本助力特性的情况下改善车辆的回正性能。

相比于传统EPS转向系统，SBW系统的主动回正控制无需考虑转向执行机构的摩擦力，而只需考虑转向盘总成自身的摩擦和阻尼，这大大降低了主动回正系统的复杂性，有助于提升主动回正系统的性能。赵含雪等^[6]针对线控转向系统，提出了一种基于滑模控制的主动回正控制方法，消除了低速下车辆的回正不足和高速下的回正超调，系统具

有较强的鲁棒性。张君等^[7]提出了一种基于转向盘转角和车速的线控转向主动回正力矩设计方法，通过调整相关参数实现了多样的回正效果，充分发挥了线控转向自由设计的优点。

以上这些主动回正方法还存在诸多不足，某些方法未提出主动回正工况的判断机制或判断机制具有缺陷，导致系统误进入或延迟进入主动回正状态。此外，现有的主动回正方法还难以确定在各车速下合适的回正转速，并且对主动回正过程中转向盘转动的平顺性控制不佳，影响回正性能。

针对以上这些缺陷，本文首先提出了一种主动回正状态判断机制，能准确有效地判断驾驶员双手是否脱离转向盘，以实现主动回正状态和转向状态之间的切换。为使各车速下的转向盘主动回正转速均较合适，并且使回正过程平顺，本文提出了一种基于回正转速参考模型的主动回正滑模控制方法，控制路感电机输出合适的主动回正力矩以使转向盘平稳地回正至中位。

1 线控转向系统动力学建模

1.1 线控转向系统

图1为线控转向系统结构，线控转向系统主要由转向盘总成、转向执行机构总成和主控制器3个部分组成^[8]。转向盘总成包括转向盘、转向盘转角传感器、力矩传感器和路感模拟电机，其主要功能是将驾驶员的转向意图传递给线控转向主控制器，同时接收主控制器传递来的力矩信号，以提供给驾驶员相应的路感信息。转向执行机构总成包括转向执行电机、前轮转向机构组件和相关传感器等，其功能是接收主控制器的指令从而控制转向车轮转动，以实现驾驶员的转向意图。

1.2 线控转向系统动力学模型

转向盘总成的动力学模型为：

$$T_{sw} = J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} + B_{sw} \dot{\theta}_{sw} + K_c \left(\theta_{sw} - \frac{\theta_m}{g_m} \right) + T_{fsw} \quad (1)$$

式中： T_{sw} 为转向盘输入力矩； θ_{sw} 为转向盘转角； J_{sw} 为转向盘总成转动惯量； B_{sw} 为转向盘总成阻尼

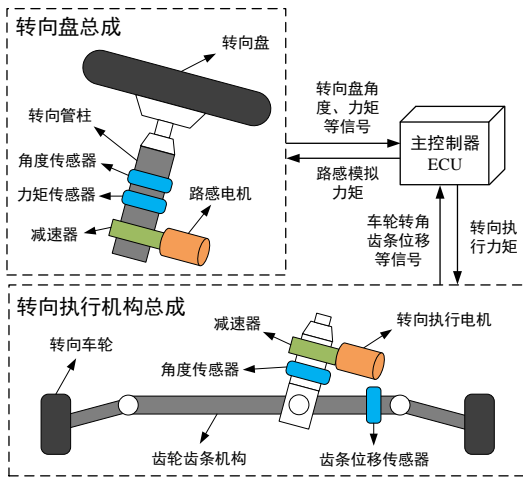


图1 线控转向系统结构

系数； K_c 为转向管柱扭转刚度； θ_m 为路感电机转角； g_m 为路感电机减速比； T_{fsw} 为转向盘总成的等效摩擦力矩。

根据现有相关研究^[9]，线控转向系统可视为刚体。基于这一假设，可以将线控转向系统等效为一个二阶系统，各部件的转动惯量、阻尼等均等效为转向盘总成，其等效动力学模型为：

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = i_{mc}T_{mo} + i_{amc}T_{ao} + T_h - T_f - i_{rc}F_{rack} \quad (2)$$

$$J = J_{sw} + i_{mc}^2 J_m + i_{amc}^2 J_{am} + i_{rc}^2 M_r \quad (3)$$

$$B = B_{sw} + i_{mc}^2 B_m + i_{amc}^2 B_{am} + i_{rc}^2 B_r \quad (4)$$

式中： θ 为转向盘角度； J 为系统等效转动惯量； B 为系统等效阻尼系数； T_{mo} 为路感电机输出力矩； T_{ao} 为助力电机输出力矩； T_h 为转向盘输入力矩； T_f 为系统等效摩擦力矩； F_{rack} 为等效齿条阻力； i_{mc} 、 i_{amc} 、 i_{rc} 分别为路感电机、助力电机和齿条至转向盘总成的等效传动比； J_m 、 J_{am} 分别为路感电机和助力电机的转动惯量； M_r 为齿条质量； B_r 、 B_m 、 B_{am} 分别为齿条、路感电机和助力电机的阻尼系数。

左右轮胎作用在齿条上的齿条力可表示为：

$$F_{rack} = \frac{M_{zl} + M_{zr}}{l} \quad (5)$$

式中： M_{zl} 、 M_{zr} 分别为左前轮和右前轮受到的绕主销的回正力矩； l 为前轮转向摇臂长度。

1.3 基于动力学模型的轮胎回正力矩计算

在具有机械连接的传统转向系统中，转向车轮受到地面的作用力产生的回正力矩能通过机械连接传递至转向盘。对于线控转向车辆，为建立转向盘

回正模型，需对轮胎回正力矩进行估计。轮胎回正力矩主要与轮胎所受到的垂向力和侧向力有关^[10]。

垂向力产生的回正力矩与主销内倾有关，其计算式为：

$$M_{zz} = (F_{zl} + F_{zr})d \sin \theta_k \sin \delta - (F_{zl} - F_{zr})d \sin \theta_c \cos \delta \quad (6)$$

式中： F_{zl} 、 F_{zr} 为左右前轮垂向力； d 为主销内移量； θ_k 为主销内倾角； θ_c 为主销后倾角； δ 为前轮转向角度。

侧向力产生的回正力矩与轮胎拖距有关，轮胎拖距可以分为与转向轮侧偏有关的气胎拖距和主销后倾引起的后倾拖距^[11]。侧向力产生的回正力矩计算式为^[12]：

$$M_{zy} = F_{yf}(t_p + t_m) \quad (7)$$

式中： F_{yf} 为车辆前轮受到的侧向力； t_p 为气胎拖距； t_m 为后倾拖距。

前轮所受侧向力可以通过魔术轮胎模型得到，其计算式为^[13]：

$$F_{yf} = D \sin \{ C \arctan [Ba - E(Ba - \arctan Ba)] \} \quad (8)$$

式中： B 、 C 、 D 、 E 为魔术轮胎模型的拟合系数； α 为轮胎侧偏角。

综上，转向前轮受到绕主销总回正力矩为：

$$M_z = M_{zz} + M_{zy} \quad (9)$$

2 主动回正系统各模块设计

2.1 基于时间窗的主动回正状态判断机制

本文提出一种基于时间窗的主动回正状态判断机制，该机制基于时间窗将系统划分为转向状态和主动回正状态，这两种状态通过该机制进行切换。当系统处于转向状态时，主动回正不会介入转向盘的正常转向操作。

为进入主动回正状态，系统应满足以下要求：

- 1) 系统当前状态为转向状态；
- 2) 进入主动回正时的转向盘转角 $|\theta_{sw}|$ 需大于设定的回正开启转角 θ_{em} ，以防止主动回正系统在驾驶员于转向盘中位附近微调转向盘时进行不必要的干预；

3) 转向盘转角 θ_{sw} 和转速 ω_{sw} 的乘积应小于 0, 以判断转向盘处于回正状态;

4) 转向盘力矩 $|T_h|$ 应小于转向盘力矩残留值 T_{low} , 以判断驾驶员双手脱离转向盘。

为防止瞬时条件的满足导致系统误进入主动回正状态, 本判断机制加入了计时器 t_{count} , 当系统判断前述 4 个条件均满足后, 计时器累加迭代步长, 否则计时器清零, 并返回至进入主动回正状态的判断机制的起点。当计时器 t_{count} 大于时间窗阈值 t_{ent} 时, 系统才会进入主动回正状态。

若转向盘转角 $|\theta_{sw}|$ 小于回正关闭转角 θ_{ext} , 或转向盘力矩 $|T_h|$ 大于标定值 T_{high} , 系统将退出主动回正状态。上述条件分别说明转向盘已回正至中位或驾驶员介入转向盘重新进行转向操作。

2.2 回正转速参考模型

线控转向系统的转向盘与车轮之间的机械连接被断开, 车轮所受到的回正力矩无法传递至转向盘。所以对于线控转向系统的主动回正控制, 首先需确定合适的转向盘回正转速, 从而控制转向盘的回正运动跟踪这一目标回正转速。

对于转向盘目标回正转速的确定, 本文建立了转向盘回正转速参考模型。此参考模型基于线控转向系统等效动力学模型计算参考回正转速, 作为后续控制的目标回正转速。由于线控转向系统中机械摩擦力矩的存在, 导致参考模型中转向盘转角无法回正至中位, 这影响了转向系统的回正性能。所以本文认为在回正转速参考模型的回正过程中, 转向电机的输出转矩能时刻补偿转向系统的等效摩擦力矩, 使转向盘回正至零位附近, 即:

$$i_{amc} T_{ao} = T_f \quad (10)$$

主动回正过程中, 驾驶员双手脱离转向盘, 同时路感电机也不工作, 均不对转向盘施加力矩, 即:

$$T_h = T_{mo} = 0 \quad (11)$$

将式 (5)、(10)、(11) 代入式 (2), 可得:

$$J\ddot{\theta}_t + B\dot{\theta}_t + i_{rc} \times \frac{M_z}{l} = 0 \quad (12)$$

式中: θ_t 为转向盘参考回正角度。

联立式(12)与式(9), 已知初始时刻的转向盘角度和转向盘转速, 解微分方程可以得到参考模型中转向盘各回正时刻的参考回正转速 $\dot{\theta}_t$ 。

在中高速下由于回正力矩过大, 经回正转速参考模型计算得到的转向盘参考回正角度会出现反向的超调振荡, 高速行驶中这种现象会极大地危害驾驶安全, 所以需设计补偿模块抑制转向盘的回正超调。以式 (12) 为基础, 增加虚拟阻尼力矩, 修正后的回正转速参考模型为:

$$J\ddot{\theta}_t + B\dot{\theta}_t + i_{rc} \times \frac{M_z}{l} - T_d = 0 \quad (13)$$

其中, T_d 为补偿阻尼力矩, 其表达式为:

$$T_d = B_d(v) \times \tanh(a_d \times \dot{\theta}_t) \quad (14)$$

$$B_d(v) = \begin{cases} 0 & v < v_0, \\ b_1 \cdot [e^{b_2(v-v_0)} - 1] & v \geq v_0. \end{cases} \quad (15)$$

式中: B_d 为补偿阻尼力矩幅值; a_d 为阻尼力矩随转向盘转速的梯度变化系数。

2.3 基于滑模控制的主动回正控制

参考式 (1), 主动回正过程中驾驶员双手脱离转向盘, 可认为 $T_{sw}=0$, 将转向盘摩擦力矩视为扰动项 $d=T_{fsw}$, 且令:

$$T_{msw} = K_c \left(\theta_{sw} - \frac{\theta_m}{g_m} \right) \quad (16)$$

式中: T_{msw} 为路感电机输出力矩等效至转向盘的力矩。则:

$$J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} + B_{sw} \dot{\theta}_{sw} + T_{msw} + d = 0 \quad (17)$$

定义转向盘转速与参考回正转速的跟踪误差为:

$$e = \dot{\theta}_{sw} - \dot{\theta}_t \quad (18)$$

设计积分滑模面为:

$$S = \lambda_1 e + \lambda_2 \int_0^t e dt \quad (19)$$

对切换函数 S 求导, 并将式 (17) 代入可得:

$$\dot{S} = \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 e = -\frac{\lambda_1}{J_{sw}} (B_{sw} \dot{\theta}_{sw} + T_{msw} + d) - \lambda_1 \ddot{\theta}_t + \lambda_2 e \quad (20)$$

采用指数趋近律如下:

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sat}(s) - kS \quad (21)$$

式中: $\text{sat}(s)$ 为饱和函数。

其表达式为:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & S > p, \\ S/p & |S| \leq p, \\ 0 & S < -p. \end{cases} \quad (22)$$

联立式 (20) 和 (21), 可解得路感电机输出力矩等效至转向盘的力矩为:

$$T_{\text{msw}} = \frac{J_{\text{sw}}}{\lambda_1} [\epsilon \text{sat}(s) + kS] - J_{\text{sw}} \ddot{\theta}_t - B_{\text{sw}} \dot{\theta}_{\text{sw}} - d + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} J_{\text{sw}} e. \quad (23)$$

3 硬件在环试验与结果分析

3.1 硬件在环试验设计

为验证和评估本文所提出的转向盘主动回正系统的有效性, 搭建了基于 dSPACE 实时仿真系统的线控转向系统硬件在环试验平台。图 2 为线控转向系统硬件在环平台, 该硬件在环系统由上位机、dSPACE 仿真系统及 ASM 车辆动力学模型、转向盘模块、驾驶员等组成。本文所使用的回正转速参考模型参数和转向盘总成硬件参数, 分别见表 1 和表 2。



图 2 硬件在环试验平台

3.2 主动回正状态判断机制试验

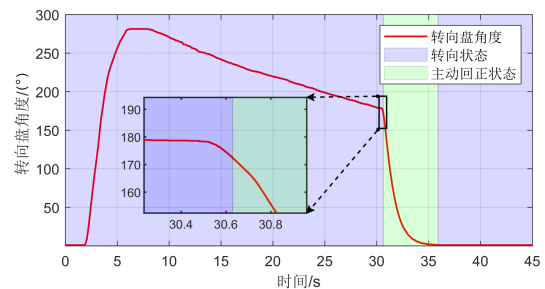
为测试本文所提出的主动回正状态判断机制的准确性和有效性, 及其对于驾驶员突然介入的过渡能力, 进行了相关试验。设定车速为 15 km/h, 进行了保舵回正和回正过程中驾驶员重新介入两种工况的测试。转向盘角度和各时刻的主动回正状态如图 3 所示。

表 1 回正转速参考模型参数

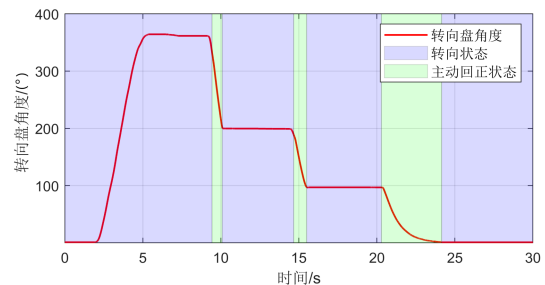
参数	值
整车质量 m/kg	1 100
前轴距 a/m	1.04
后轴距 b/m	1.56
主销内移量 d/m	0.11
主销内倾角 $\theta_k/(\circ)$	13
主销后倾角 $\theta_c/(\circ)$	3
气胎拖距 t_p/m	0.035
后倾拖距 t_m/m	0.025
前轮转向摇臂长度 l/m	0.1
转向系统等效转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.12
转向系统等效阻尼 $B/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	0.85
齿条至转向盘的等效传动比 i_{rc}/m	0.003 8

表 2 转向盘总成硬件参数

参数	值
转向盘总成转动惯量 $J_{\text{sw}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.018
转向盘总成阻尼 $B_{\text{sw}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	0.132
转向盘总成等效摩擦力矩 T_{fsw}/Nm	0.6



(a) 保舵回正



(b) 回正过程中驾驶员重新介入

图 3 主动回正状态判断机制试验曲线

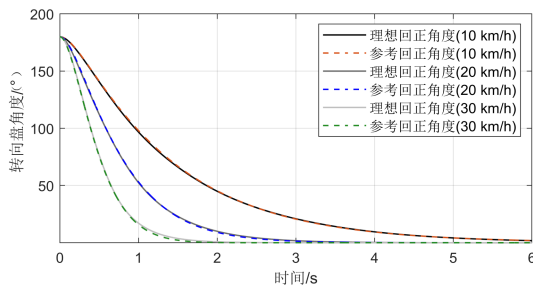
在保舵回正工况中, 驾驶员将转向盘从 270° 缓慢回正至 180° 后松开转向盘。试验结果表明, 在驾驶员的回正操作时间段内, 主动回正状态没有被误

触发，该主动回正判断机制具有准确性；在驾驶员松开转向盘后，主动回正机制能被快速触发，其触发时间约为 0.12 s，该主动回正判断机制具有有效性。回正过程中驾驶员重新介入的试验结果表明，转向盘能对驾驶员的介入进行有效过渡，主动回正状态切换准确而迅速。

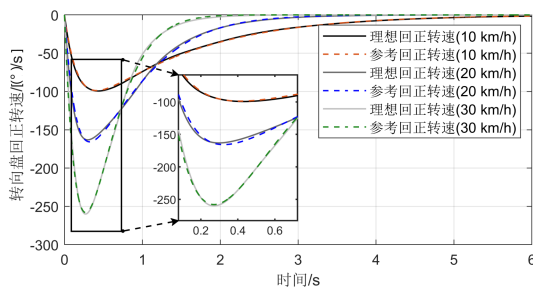
3.3 回正转速对比试验

为验证本文所提出的回正转速参考模型与无摩擦理想转向机构回正过程的相似程度，设计了回正转速对比试验。设置转向盘回正起始角度为 180°，车速分别为 10、20、30 km/h，对比本文所提出的回正转速参考模型与 ASM 中的无摩擦理想回正模型的回正过程。

图 4 为回正角度对比曲线和回正转速对比曲线，表 3 为回正转速对比指标。由表可知，各车速下参考回正角度与理想回正角度的最大误差不超过 2°，平均相对误差小于 2%；参考回正转速与理想回正转速的平均误差在 3 (°)/s 以内，平均相对误差小于 3%。该对比试验表明，本文所提出的回正转速参考模型能真实反映无摩擦理想转向机构的回正过程，给予驾驶员和车辆真实的回正反馈。



(a) 转向盘角度



(b) 转向盘转速

图 4 低速下回正角度和转速对比曲线

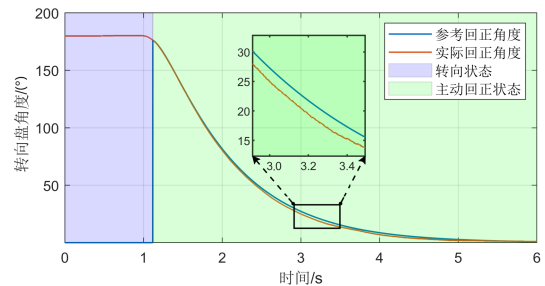
表 3 回正转速对比指标

车速/(km/h)	最大误差/[(°)/s]	平均误差/[(°)/s]	平均相对误差/%
10	2.947 0	0.950 7	2.13
15	7.056 4	2.034 4	2.93
20	8.682 1	2.650 6	2.65

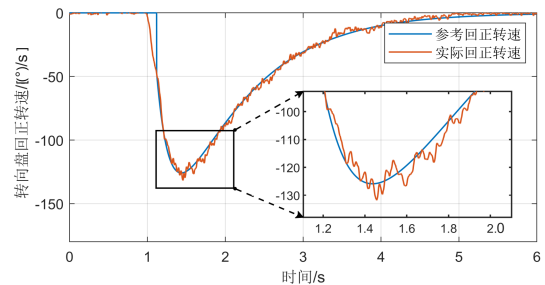
3.4 低速回正试验

为测试低速下基于滑模控制的主动回正控制策略的控制效果，进行了低速回正试验。设置车速为 15 km/h，转向盘回正起始角度为 180°。

滑模控制对参考模型的回正跟踪曲线如图 5 所示。由图可知，转向盘能有效跟踪回正转速参考模型的回正状态，回正转速平均误差为 2.35 (°)/s，平均相对误差为 3.29%，考虑到此回正转速是通过转向盘转角传感器硬件采集得到的，携带一定的采集噪声，因而会造成回正转速曲线的抖动。本文所提出的基于滑模控制的主动回正控制策略能使转向盘顺畅地回正至零位，且运动过程与参考模型相似，以使转向盘回正转速与真实车辆保持一致。



(a) 转向盘回正角度跟踪曲线



(b) 转向盘回正转速跟踪曲线

图 5 滑模控制对参考模型的回正跟踪曲线

3.5 高速回正试验

为测试本文所提出的主动回正控制策略在高速

下的控制效果,进行了高速回正试验,设置车速为 90 km/h,转向盘回正起始角度为 60° 。

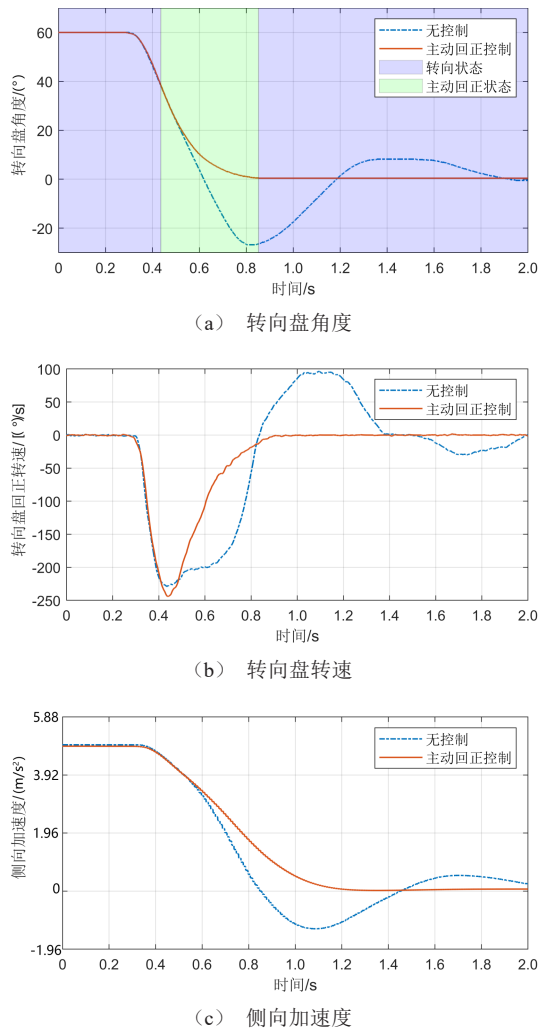


图6 高速下转向盘回正性能曲线

无控制下和施加主动回正控制下的回正过程如图6所示,无控制下转向盘回正会产生反向超调振荡,最大反向角度为 26.8° 。加入主动回正控制后,

转向盘的回正过程更加顺畅,反向超调现象被消除。对比图6c可知,主动回正控制同样消除了车辆在回正过程中侧向加速度的超调振荡,改善了回正过程中车辆的侧向运动状态,提高了高速下车辆的回正性能和回正安全性。

4 结论

针对线控转向系统主动回正控制中状态判断机制缺陷、参考回正转速难以确定以及回正平顺性差等问题,本文提出了一种基于回正转速参考模型和滑模控制的转向盘主动回正控制方法,开展了以下研究。

1) 设计并建立了基于时间窗的主动回正状态判断机制,利用转向盘角度、转速、力矩对驾驶员的回正意图进行了准确的判断。通过仿真试验与分析,该判断机制在驾驶员松开转向盘后能快速触发主动回正状态,同时确保其不会在正常转向中被误触发而影响转向操作。

2) 基于轮胎回正力矩建立了回正转速参考模型,用于主动回正控制的参考跟踪。仿真试验表明,该回正转速参考模型能真实反映无摩擦理想转向机构的回正过程,从而给予驾驶员和车辆真实的回正反馈。

3) 基于回正转速参考模型设计了主动回正滑模控制策略。仿真试验表明,该滑模控制能使转向盘顺畅地回正至零位,且有效跟踪参考回正转速,以使线控转向系统中的转向盘回正转速与真实车辆保持一致。

参考文献 (References)

- [1] 李绍松,宗长富,吴振昕,等.电动助力转向主动回正控制方法[J].吉林大学学报(工学版),2012,42(6):1355-1359.
LI Shaosong, ZONG Changfu, WU Zhenxin, et al. Active Return-to-Control Method of Electric Power Steering [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(6): 1355-1359. (in Chinese)
- [2] 吴立群,李媛媛,陈少棠.电动助力转向系统主动回正控制方法[J].西安邮电大学学报,2020,25(2):68-73.
WU Liqun, LI Yuanyuan, CHEN Shaotang. An Active Return Control Method of Electric Power Steering [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2020, 25(2): 68-73. (in Chinese)
- [3] DU Panpan, SU Hao, TANG Gongyou. Active Return-to-Center Control Based on Torque and Angle Sensors for Electric Power Steering Systems [J]. Sensors, 2018, 18(3): 1-12.
- [4] 侯训波,刘小波,张作功,等.电动助力转向系统主动回

- 正控制策略和算法研究[J].汽车科技,2019(2):12-20.
HOU Xunbo, LIU Xiaobo, ZHANG Zuogong, et al. Study on Strategy and Algorithm for Active Returning Control in EPS[J]. Auto Sci-Tech, 2019(2): 12-20. (in Chinese)
- [5] WU Yangfei, HOU Bochuan, ZHOU Guangfei, et al. A Smooth Angle Velocity Active Return-to-Centre Control Based on Single Neuron PID Control for Electric Power Steering System[C]//2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Aug. 23, 2020, Anhui, China. Piscataway NJ: IEEE, c2020: 864-869.
- [6] 赵含雪, 李芳, 吴艳, 等. 线控转向系统路感模拟与主动回正控制[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(4): 64-72.
ZHAO Hanxue, LI Fang, WU Yan, et al. Road Feel Simulation and Active Return Control Strategy of Steer-by-Wire System [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(4): 64-72. (in Chinese)
- [7] 张君, 邱江波, 屈翔, 等. 线控转向系统路感反馈与主动回正控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(6): 75-84.
ZHANG Jun, QIU Jiangbo, QU Xiang, et al. Road Feeling Feedback and Active Correction Control of the Steer-by-Wire System [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(6): 75-84. (in Chinese)
- [8] 贺林, 徐子昂, 黄春荣, 等. 线控转向系统转角预测滑模控制算法研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2200-2208.
HE Lin, XU Ziang, HUANG Chunrong, et al. Research on Sliding Mode Control Algorithm for Angle Tracking Prediction of Steer-by-Wire System [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2200-2208. (in Chinese)
- [9] WU Xiaodong, ZHANG Mingming, XU Min. Active Tracking Control for Steer-by-Wire System with Disturbance Observer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5483-5493.
- [10] LI Ao, CHEN Yan, DU Xinyu, et al. Enhanced Tire Blowout Modeling Using Vertical Load Redistribution and Self-Alignment Torque[J]. ASME Letters in Dynamic Systems and Control, 2021, 1(1): 011001.1-011001.6.
- [11] BALACHANDRAN A, GERDES J C. Designing Steering Feel for Steer-by-Wire Vehicles Using Objective Measures [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(1): 373-383.
- [12] HSU Y H J, LAWS S M, GERDES J C. Estimation of Tire Slip Angle and Friction Limits Using Steering Torque[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(4): 896-907.
- [13] LIANG Jinhao, FENG Jiwei, FANG Zhenwu, et al. An Energy-Oriented Torque-Vector Control Framework for Distributed Drive Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4014-4031.
- [14] LI Shaosong, GUO Luping, CUI Gaojian, et al. Return Control of Electronic Power Steering Unequipped with an Angle Sensor [J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(2): 349-357.

作者简介



刘书翰 (2000-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向为线控转向路感模拟与四轮转向控制。
E-mail: liushuhan@sjtu.edu.cn

通信作者



吴晓东 (1984-), 男, 安徽舒城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为车辆底盘和运动控制技术。
E-mail: xiaodongwu@sjtu.edu.cn