

基于线控转向的汽车转向系统路感策略研究

王琳慧¹ 付 晟² 李亚蕾² 张 婕² 刘丹阳²

1. 南昌工学院 江西南昌 330108

2. 江铃汽车股份有限公司 江西南昌 330001

摘要: 随着汽车智能化与电动化的快速发展, 线控转向 (Steer-by-Wire, SBW) 系统作为新一代底盘控制技术, 逐渐取代传统机械或液压助力转向结构。该系统通过电信号实现驾驶员转向意图与车轮转角之间的传递, 取消了机械连接机构, 为车辆轻量化、智能化和自动驾驶提供了技术基础。然而, 机械通路的消失也使得驾驶员无法感受到来自路面的反作用信息, 导致“路感”缺失, 影响驾驶安全与舒适性。针对这一问题, 本文提出了一种基于双通道融合的线控转向系统路感控制策略。该策略在物理层利用卡尔曼滤波 (KF) 模型对齿条力进行估算, 实现真实路感信息重建; 在控制层引入模糊自适应PID算法, 动态调节反馈力矩, 实现不同车速与驾驶风格下的自适应调节。本文在MATLAB/Simulink平台搭建仿真模型, 并建立硬件在环 (HIL) 实验系统对控制策略进行验证。结果表明, 该策略能有效重建自然的方向盘力感, 实现低速轻便、高速稳重的理想转向特性, 为智能底盘与自动驾驶车辆提供了可行的技术路径。

关键词: 线控转向; 路感控制; 卡尔曼滤波; 模糊PID; 硬件在环仿真

引言

汽车转向系统的核心任务是实现驾驶员对车辆行驶方向的精确控制。传统机械或电动助力转向 (EPS) 系统通过机械传动轴将驾驶员转角与车轮转角相连, 驾驶员可直接感受到来自轮胎与路面的反作用力, 即“路感”。这种反馈使驾驶者能够判断路面状况与附着极限, 从而提高操控稳定性与安全性^[1]。

然而, 随着自动驾驶、线控底盘及电动平台的推广, 传统机械连接成为车辆集成化发展的障碍。线控转向 (SBW) 技术应运而生, 它通过电子传感与执行单元替代机械连接, 实现转向信号的全电子化。系统主要包括转向盘模块、转角传感器、电子控制单元 (ECU)、执行电机模块以及反馈电机模块。驾驶员的操作信号经传感器采集后传至ECU, 经算法计算生成理想前轮转角, 并驱动执行电机转向; 同时, ECU根据车辆动力学状态生成相应的反馈力矩, 通过反馈电机作用于方向盘, 实现虚拟路感。但由于机械通路的缺失, 驾驶员无法直接获得来自轮胎与地面的物理反馈, 若路感算法设计不合理, 可能产生漂浮感、迟滞感或过度灵敏现象^[2]。因此,

如何重构真实、稳定且可调的路感反馈, 是SBW系统控制策略研究的关键问题。

一、国内外研究现状与理论基础

(一) 国内外研究进展

线控转向系统作为汽车底盘电控化的重要方向, 其“路感重建”问题长期为研究热点。总体上, 近年国内外的研究呈现出以下几条主要发展脉络:

1. 基于观测/估计的物理量重建成为主流方向

由于直接在转向执行机构上安装高精度齿条力传感器成本高且易受安装条件限制, 越来越多的研究采用观测器或滤波器估算齿条力, 再将估计值映射为方向盘反馈力矩。此类方法能够在含噪环境下滤除测量噪声并实时估计路面作用力^[3]。

2. 智能/自适应控制用于提升平顺性与个性化体验

仅靠物理模型往往难以同时兼顾低速轻便与高速稳重两种驾驶感受。为此, 研究者将模糊控制、模糊-自适应PID、滑模或其他自适应策略与物理估计结果联合使用, 通过在线调整控制增益或融合权重, 使反馈力矩在不同车速工况下自动匹配驾驶员期望, 从而在真实性与舒适性之间取得平衡, 显著降低超调并缩短响应时间^[4]。

基金项目: 南昌工学院科技计划项目: 基于线控转向的汽车转向系统路感策略研究 NGKJ-23-11

3. 对扰动/摩擦的补偿与鲁棒估计持续深入

路面高频震动、齿条/齿轮摩擦、传感器故障等实际问题会严重影响路感质量^[5]。近期工作聚焦于高精度扰动观测器、摩擦建模与自适应补偿,以及面向部分传感器故障的鲁棒估计算法,目的在于在恶劣工况下也能维持稳定且可信的路感输出^[6]。

4. 硬件在环(HIL)与人体主观评价成为验证常态化手段

由于SBW系统涉及人车闭环的人机工效问题,纯仿真无法完全替代人工感知评估。近年来大量研究将控制算法先在MATLAB/Simulink中仿真,随后在HIL平台上运行(包含方向盘电机、执行机和力矩/力传感器),并辅以主观评价试验,形成“仿真→HIL→主观/驾驶员评价”的验证流程,从而既验证控制稳定性也评价驾驶员接受度^[7]。

5. 产业化与量产样车推动了工程化实现路径

近年有厂商/车型开始将线控或含线控功能的转向装车试验与用户体验评估结合,推动了对低电压供电、冗余设计、容错切换策略以及用户可感知手感设计的工程实现探索。与此同时,行业内关于低压供电对于线控电机的可行性、以及在失效下的机械冗余或软件容错方案的讨论也日益增多^[8]。

(二) 路感产生机理分析

路感是方向盘对驾驶员手部产生的反作用力,主要包括回正力矩和摩擦力矩两部分。回正力矩反映轮胎与地面的相互作用,是主要的路面信息来源;摩擦力矩则主要由机械摩擦和阻尼引起,起到削弱噪声的作用。传统转向系统通过机械传动自然形成路感,而SBW系统则必须通过电子算法“虚拟”出这一过程。

路感控制的核心目标是构建一个函数关系:

$$T_f = f(v, \delta, \dot{\delta}, F_y)$$

其中 v 为车速, δ 为方向盘转角, $\dot{\delta}$ 为转角变化率, F_y 为侧向力。该函数需要在不同车速和转向状态下保持平滑与真实。

二、路感控制策略设计

(一) 系统总体结构

本文设计的SBW系统路感控制策略采用“双通道融合”结构,主通道为基于KF的物理估算路径,用于恢复真实路感信息;副通道为基于模糊PID的智能补偿路径,用于改善系统响应特性与个性化调节能力。两通道输出按照权重系数进行融合:

$$T_{total} = \omega_1 T_{KF} + \omega_2 T_{PID}$$

其中 $\omega_1 + \omega_2 = 1$,在舒适模式下 $\omega_1 = 0.6$,运动模式下 $\omega_1 = 0.8$ 。

(二) 基于卡尔曼滤波的齿条力估算

齿条力被选为反映前轮受力的重要物理量。由于直接测量齿条力会增加传感器成本,本文采用KF算法进行估算。系统状态方程如下:

$$\dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_d + G_d \omega_d, \quad z_d = H_d x_d + v_d$$

其中状态向量 $x_d = [x_r, \dot{x}_r, F_r]^T$,表示齿条位移、速度与受力。过程噪声 ω_d 与测量噪声 v_d 通过协方差矩阵动态更新。

(三) 基于模糊PID的自适应控制

模糊PID控制器以转向盘期望力矩 T_{ref} 与实际力矩 T_f 的误差 e 及其变化率 \dot{e} 为输入,通过模糊规则表实现参数在线调整。控制律如下:

$$u(t) = K_p(t)e + K_i(t) \int e dt + K_d(t) \dot{e}$$

在低速($v \leq 40$ km/h)时,控制器自动提高助力比例(K_p 下降, K_i 上升),减小驾驶阻力;在高速($v \geq 80$ km/h)时,提高阻尼系数(K_p 上升, K_d 上升),增强方向稳定性。

三、仿真与实验验证

(一) 仿真模型搭建

在MATLAB/Simulink环境下建立SBW系统仿真模型。模型由三个主要子系统组成:方向盘模块、执行机构模块和路感反馈模块。实验数据选取整车质量1450 kg,前轮转向刚度35000 N/m,转向盘转动惯量 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。(图1)

(二) 仿真结果分析

(1) 低速工况($v=30$ km/h)

系统输出的回正力矩曲线平滑,无明显震荡。方向盘反力峰值约为 $2.4 \text{ N} \cdot \text{m}$,与传统EPS系统误差不超过5%。驾驶员操作轻便,转向平顺。

(2) 高速工况($v=90$ km/h)车辆在高速变道时,系统反馈力矩随车速线性增加,峰值约 $3.8 \text{ N} \cdot \text{m}$,超调率小于3%。模糊PID路径在车速上升过程中自动提高阻尼,避免了过度助力导致的“漂浮感”。

(三) 硬件在环(HIL)试验

为验证控制策略的工程可行性,搭建硬件在环系统。试验平台包括方向盘模块、执行机构模块与阻力模拟模块,采用xPC实时系统进行控制与数据采集^[9]。

如图2所示为模糊自适应PID与常规PID在方向盘回正力矩控制中的响应曲线对比。从图中可以看出,目标

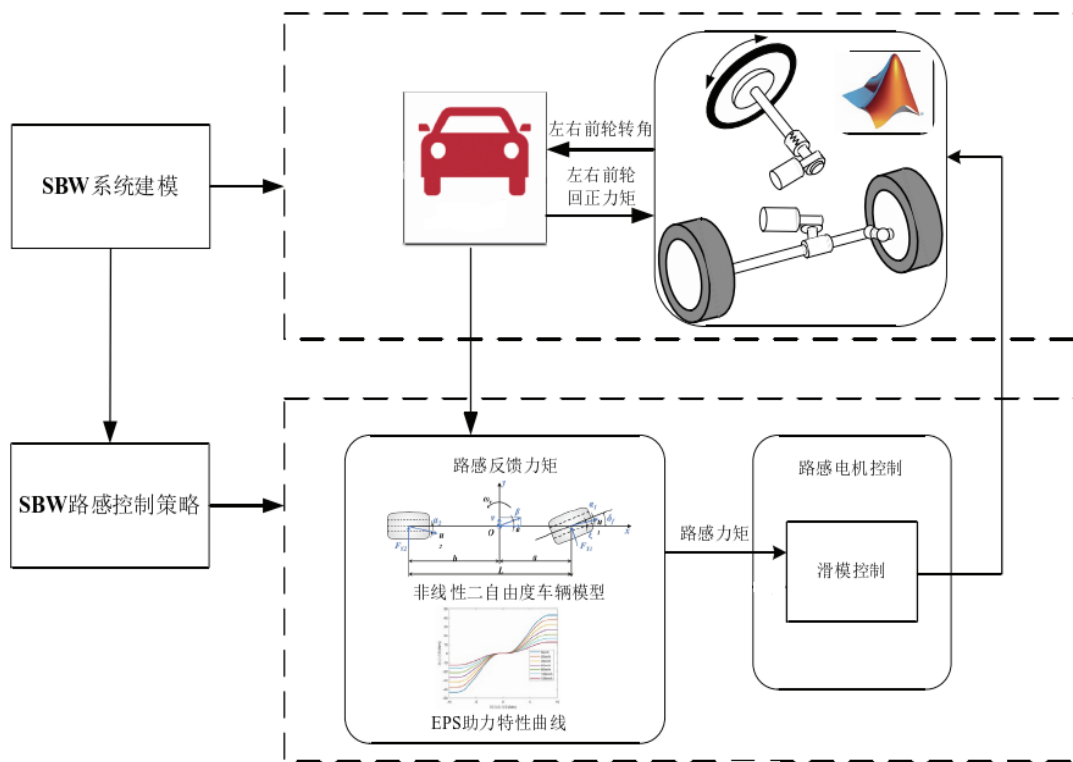


图1 SBW系统仿真模型

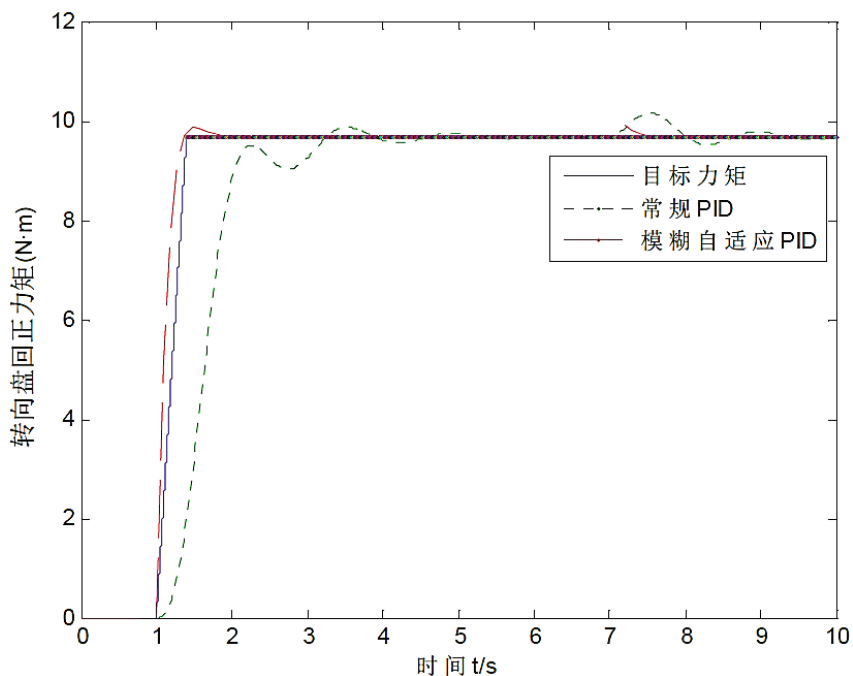


图2 路感模拟仿真结果

回正力矩为 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，模糊自适应PID与常规PID在动态响应特性上存在明显差异。常规PID在初始阶段出现较大的超调与振荡，最大超调约为8%，并伴随轻微的力矩波动，系统稳定时间约为3 s。而模糊自适应PID控制曲

线能在约1.5 s内迅速达到目标值，且几乎无超调和振荡现象，力矩变化更加平滑。

结果表明，模糊自适应PID控制器能够根据误差及误差变化率在线调整比例、积分与微分参数，使系统在

保持快速响应的同时有效抑制过冲与震荡，提高了力矩输出的平稳性与控制精度。相比之下，常规PID由于参数固定，难以适应非线性及动态工况，表现出响应慢、超调大、稳定性差等缺点。

综上，模糊自适应PID控制策略在回正力矩跟踪控制中表现出更优的动态性能和稳态精度，可显著提升线控转向系统的路感平顺性与驾驶舒适度。

四、结果与讨论

通过仿真与实测结果可见，本文提出的双通道控制策略能够有效融合物理模型与智能控制，实现高精度、高舒适度的路感反馈。与单一KF或单一PID策略相比，其在响应速度、稳定性和驾驶员满意度方面均有显著提升。

KF算法在动态估算中表现出优良的滤波性能，有效抑制测量噪声，保证了力矩反馈的稳定性；模糊PID则提供了对不同车速和驾驶风格的自适应能力，使系统能够根据驾驶员意图动态调整助力强度。

该策略的工程实现难度较低，仅需在现有SBW控制器中增加信号融合模块与模糊参数调节逻辑即可实现。对于未来自动驾驶车辆，该方法可进一步扩展为基于AI学习的个性化路感系统。

五、结论与展望

本文在综述现有SBW系统研究成果的基础上，提出了结合卡尔曼滤波与模糊自适应PID的双通道路感控制策略，既保证了路感反馈的真实性，又提升了系统的自适应与舒适性。通过MATLAB/Simulink仿真与硬件在环实验验证，KF算法实现了对齿条力的高精度估算（相关系数0.98），模糊PID控制使系统响应更快、力矩更平顺。整体方案在低速与高速工况下均表现出良好的动态

性能。研究成果为智能底盘与自动驾驶转向系统提供了技术参考。未来工作将重点开展以下三个方向：基于实车测试的算法验证与参数标定；引入机器学习算法实现驾驶员个性化路感映射；推动路感控制与车辆主动安全系统的协同融合。

参考文献

- [1] 魏龙. 线控转向系统路感重构策略及测试研究[D]. 吉林大学, 2025.
- [2] 金明亮, 张兰春, 朱剑峰. 基于全局响应面法的前悬架下摆臂尺寸优化设计[J]. 江苏理工学院学报, 2025, 31(02): 76-84.
- [3] 邢浩. 基于路感模拟的线控转向系统控制策略研究[D]. 盐城工学院, 2025.
- [4] 孙有平, 李崧, 何江美, 等. 汽车线控转向系统稳定性控制策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(07): 37-43.
- [5] 刘鹏超. 汽车线控转向系统控制与路感模拟研究[D]. 沈阳工业大学, 2024.
- [6] 何聪. 考虑个性化路感反馈的线控转向系统控制策略研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [7] 张岩. 汽车线控转向系统执行机构控制策略研究[D]. 长安大学, 2024.
- [8] 袁臣虎, 杨玉明, 刘晓明, 等. 基于PMSM的线控转向系统路感控制策略[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(04): 64-69.
- [9] 公伟强. 线控转向系统控制策略及路感模拟的研究[D]. 长安大学, 2013.