

基于多传感融合的线控转向车辆路感模拟算法研究

王佳琦<sup>1</sup>, 赵贺森<sup>2</sup>, 乔斌<sup>2</sup>, 陈国迎<sup>3</sup>

- 1. 吉林大学汽车工程学院
- 2. 重庆长安汽车股份有限公司
- 3. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室

**【摘要】** 驾驶员利用转向盘上的转矩获得有关道路和轮胎的状态信息, 因此线控转向系统中需要路感电机为驾驶员提供路感力矩。本文分析了传统转向系统路感产生的原理, 提出一种考虑补偿力矩、限位力矩以及转向阻力矩的路感模拟算法, 搭建了基于轮胎回正力矩估算的转向阻力矩计算方法; 使用多传感器融合的方法实时估计车辆状态信息将其用于回正力矩的计算。最后进行硬件在环实验分析, 结果表明, 所设计的路感模拟算法能够实时反馈路面和车辆状态信息, 很好地满足驾驶员操纵需求。

**【关键词】** 线控转向, 路感模拟, 回正力矩, 多传感器融合

Steering Feel for Steer-by-Wire Vehicles Algorithm Based on Multi-sensor Fusion

Wang Jiaqi<sup>1</sup>, Zhao Hesen<sup>2</sup>, Qiao Bin<sup>2</sup>, Chen Guoying<sup>3</sup>

- 1. Jilin University, College of Automotive Engineering
- 2. Chongqing Changan Automobile Company Limited
- 3. Jilin University, State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control

**Abstract:** The driver uses the torque on the steering wheel to obtain information about the state of the road and tires, so it is necessary to add road-sensing motors in the wire-controlled steering system to provide the driver with road-sensing torque. In this paper, we analyze the principle of road sensing in conventional steering systems, propose a road sensing simulation algorithm considering compensation torque, limiting torque and steering resistance torque, and build a steering resistance torque calculation method based on the estimation of return torque; we use a multi-sensor fusion method to estimate the vehicle state information in real time and use it for the calculation of return torque. Finally, the hardware-in-the-loop experimental analysis shows that the designed road-sensing simulation algorithm can provide real-time feedback of road and vehicle status information, which can well meet the driver's maneuvering requirements.

**Key words:** SBW, steering feel, aligning torque, multi-sensor fusion

引言

线控转向系统 (Steer-by-wire, SBW) 转向盘与转向执行机构直接拿没有机械结构的连接, 转向轮受到的力矩无法直接传递到转向盘, 导致驾驶员无法感知路面和车辆信息<sup>[1-3]</sup>。因此, 需要对路感进行模拟。目前主要的路感模拟方法分为动力学计算法和函数拟合法。文献 [4] 提出了一种用于汽车转向系统 (SBW) 的自适应摩擦力矩补偿方案, 有效地减少了由机械摩擦引起的转向盘转矩波动, 并能自适应地匹配不同的执行器。文献 [5] 在整合 SBW 系统的转向盘模块和转向执行器模块元素的基础上, 提出了一种性能可调的路感系统, 驾驶员可以通过调整公式中的参数来获得理想的路感性能, 并根据中等类型驾驶员的情况, 提出了一套调整规则来确定参数的具体数值。文献 [6] 从驾驶员偏好转向盘转矩的角度出发, 在分析转向盘转矩影响因素的基础之上, 提出一种考虑摩擦力矩、阻尼控制力矩、限位控制力矩以及主动回正力矩的线控转向系统转向盘转矩的模型, 并通过试验数据对模型中的参数进行辨识。如图 1 所示本文设计了一种考虑反馈力矩、限位力矩和基于多传感融合的转

向阻力矩的路感模拟算法, 采用动力学计算法模拟路感。为解决转向阻力矩计算过程中车辆动态参数难以获取的问题, 使用多传感器融合的方法实时估计车辆状态, 将估计的质心侧偏角、车速等状态信息输入回正力矩估算模型, 实现路感力矩模拟。

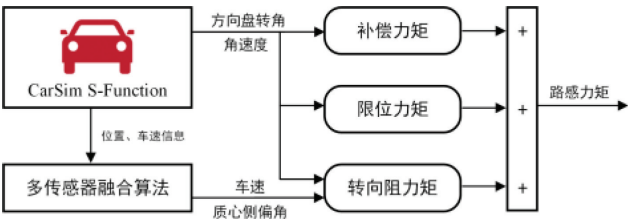


图 1 路感力矩模型结构

1 路感系统设计

1.1 路感模型

SBW 系统中, 驾驶员的转向指令需要通过电信号传递到转向执行机构, 因此 SBW 系统一般包括转向盘总成和转向执行总成两部分, 由路感电机为驾驶员提供路面反馈信

息,即产生路感力矩<sup>[7]</sup>。驾驶员感受到的路感力矩表示为:

$$T_h = T_c + T_l + T_i \quad (1)$$

式中,  $T_h$  为路感力矩,即路感电机的输出力矩;  $T_c$  为补偿力矩,模拟传统转向系统中由机械系统结构产生的力矩;  $T_l$  为限位力矩,模拟机械系统限位装置产生的力矩;  $T_i$  为转向阻力矩,模拟轮胎回正力矩造成的力矩。

## 1.2 补偿力矩

传统转向系统由于部件较多且结构复杂,在转动时可以明显感受到摩擦力矩,但 SBW 系统内部摩擦仅为  $0.1 \sim 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ <sup>[8]</sup>,几乎无法被驾驶员感受到,因此需要对 SBW 系统转向盘总成进行摩擦补偿,由于库仑摩擦模型在转向盘角速度为零时极易引起转向盘抖动,因此本文利用双曲正切函数代替库仑摩擦模型。摩擦补偿力矩表达为:

$$T_{fric} = k_f \tanh(\alpha_f \cdot \dot{\theta}_{sw}) \quad (2)$$

式中,  $\alpha_f$  为梯度变化系数;  $\dot{\theta}_{sw}$  为转向盘角速度;  $k_f$  为摩擦补偿系数,大小近似等于库仑摩擦力矩。

车辆在高速行驶时,较小的转向盘转角输入就有可能造成较大的侧向加速度变化,因此为防止车辆失稳,需要在 SBW 系统中加入阻尼补偿力矩和惯性补偿力矩,用于模拟机械式转向系统中的阻尼和惯性力矩。阻尼补偿力矩表达为:

$$T_d = k_d \dot{\theta}_{sw} \quad (3)$$

式中,  $k_d$  为阻尼补偿系数。惯性补偿力矩表达为:

$$T_i = k_i \ddot{\theta}_{sw} \quad (4)$$

式中,  $\ddot{\theta}_{sw}$  为转向盘角加速度;  $k_i$  为惯量补偿系数。

车辆在低速行驶时,由于轮胎回正力矩较低,不足以克服摩擦等阻力,因此还需要设计主动回正补偿力矩,以保证车辆在低速时快速回正。回正补偿力矩表示为:

$$T_a = k_a \theta_{sw} \quad (5)$$

式中,  $k_a$  为回正补偿系数。

## 1.3 限位力矩

传统转向系统在前轮转角到达极限位置时,机械结构会产生限位力矩,限制转向盘最大转角。SBW 转向系统不存在限位结构,因此需要增加限位力矩使驾驶员感知到车轮是否到达极限位置。为尽量还原机械式限位结构手感,模拟较为平滑的力矩变化,限位力矩表示为如下二次函数模型:

$$T_{lim} = \begin{cases} k_{lim}(\theta_{sw} - \theta_{lim})^2 & |\theta_{sw}| > \theta_{lim} \\ 0 & |\theta_{sw}| \leq \theta_{lim} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\theta_{sw}$  为转向盘转角;  $\theta_{lim}$  为转向盘左、右转角的极限位置;  $k_{lim}$  为限位控制力矩系数。

## 1.4 转向阻力矩

在图 2 所示传统转向系统中,转向轮受到由地面侧向力与垂向力产生的回正力矩,并通过机械结构反馈到转向盘上形成转向阻力矩,这是驾驶员感知车辆行驶状态和路面状况的主要途径。SBW 系统中,通过车辆行驶状态参数计算得到车轮回正力矩,从而得出的转向阻力矩,既可以反映当前行驶状况,又可以消除路面冲击对驾驶员转向舒适性的影响。图 3 为传统车辆的悬架结构,其中  $tm$  为后倾拖距,  $tp$

为轮胎拖距。轮胎侧向力和垂向力产生的回正力矩构成了转向阻力矩<sup>[9]</sup>。从图中可以看出,由轮胎侧向力产生的力矩可表示为:

$$T_y = -(F_{yfl} + F_{yfr})(t_m + t_p) \cos \sqrt{\theta_c^2 + \theta_k^2} \quad (7)$$

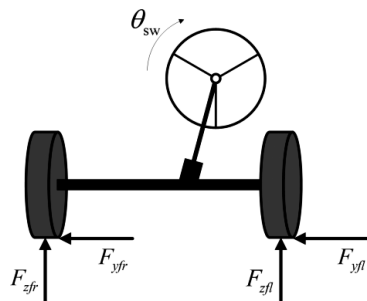


图2 传统转向系统受力

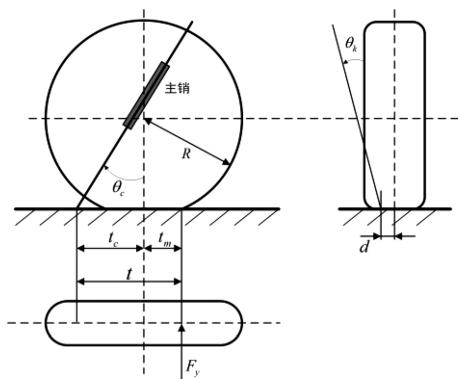


图3 传统车辆悬架结构

由轮胎垂向力产生的力矩可表示为:

$$T_z = -(F_{zfl} + F_{zfr}) d \sin \theta_k \sin \theta_{sw} + (F_{zfl} - F_{zfr}) d \sin \theta_c \sin \theta_{sw} \quad (8)$$

综上,转向阻力矩  $T_t = k(T_y + T_z)$ ,  $k$  为转向传动比

## 2 轮胎回正力矩估算

### 2.1 车辆模型和轮胎模型的建立

车辆模型采用二自由度模型,如图 4 所示,运动方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{mv_x} - r \\ \dot{r} = \frac{l_f F_{yf} + l_r F_{yr}}{I_z} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $m$  为整车质量;  $I_z$  为绕  $z$  轴的转动惯量;  $F_{yf}$  和  $F_{yr}$  分别是前后轮产生的轮胎侧向力。对于前轮转向车辆的二自由度模型,前车轮的轮胎侧偏角如下:

$$\alpha_f = \theta_f - \delta = \text{atan}\left(\frac{v_y + r l_f}{v_x}\right) - \delta \quad (10)$$

根据小角度定理,轮胎侧向力与垂向力产生的力矩可以分别简化为:

$$T_y = -F_{yf}(t_m + t_p) \quad (11)$$

$$T_z = -F_{zf} d \sin \theta_k \sin \theta_{sw} \quad (12)$$

式中,  $F_{zf}$  为前轮所受垂向力;  $d$  为主销内移量;  $\theta_k$  为主销内倾角。根据 Fiala 提出的刷子轮胎模型<sup>[10]</sup>,轮胎侧向力与质



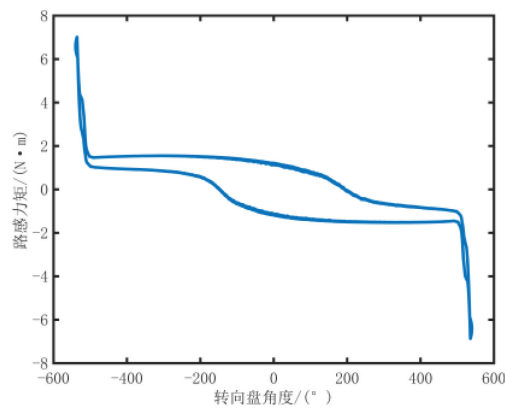


图 6 20km/h 路感力矩

3.3 中心区特性实验

车速设为 60km/h，转向盘角度设置为幅值为 50 的正弦曲线，使得侧向加速度在±0.2g 左右，仿真结果如图 7 所示，中心区特性实验评价指标见表 2：

表 2 中心区特性评价指标

评价指标	SBW
0g 处的力矩/(N·m)	0.6
0g 处的力矩梯度/(N·m/g)	23.4
0.1g 处的力矩/(N·m)	2.2
0.1g 处的力矩梯度/(N·m/g)	9.2

由表中可以得出以下结论：

1) 侧向加速度为 0g 时，路感力矩为 0.6N·m，表征了转向系统在高速时的摩擦力矩较小，减轻摩擦对驾驶员路感的影响。

2) 侧向加速度为 0g 时的路感力矩梯度为 23.4N·m/g，表征了所提出的路感模拟算法可以使驾驶员获得较为清晰的路感。

3) 侧向加速度为 0.1g 时的路感力矩梯度下降为 9.2N·m/g，表征了转向系统有较好的转向灵敏性。

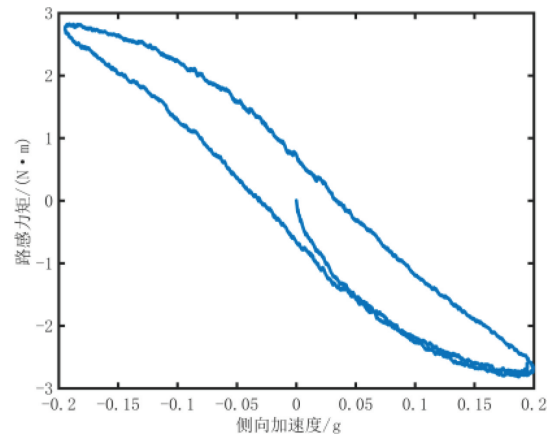


图 7 60km/h 路感力矩

4 结论

1) 本文设计了一种考虑补偿力矩、限位力矩、转向阻力矩的路感模拟算法，建立了二自由度模型车辆模型、轮胎模型和回正力矩模型。

2) 建立了基于车辆动力学多传感器融合算法，并与传统 GPS/IMU 融合算法进行了比较，验证了所提出的 GPS/IMU/DR 融合算法的稳定性

3) 通过 CarSim 与 matlab/Simulink 联合仿真，设置低速和中心区实验两种工况，验证了所提出的路感模拟算法在低速时的转向轻便性以及高速时的清晰路感。

参 考 文 献

[1] LIU A, CHANG S. Force feedback in a stationary driving simulator [C]//1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. IEEE, 1995, 2: 1711-1716.

[2] FORSYTH B A C, MACLEAN K E. Predictive haptic guidance: Intelligent user assistance for the control of dynamic tasks [J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2005, 12 (1): 103-113.

[3] SWITKES J P, ROSSETTER E J, COE I A, et al. Hand-wheel force feedback for lanekeeping assistance: Combined dynamics and stability [J]. 2006.

[4] LIANG X, ZHAO L, WANG Q, et al. A novel steering-by-wire system with road sense adaptive friction compensation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 169: 108741.

[5] ZHENG H, ZHOU J, LI B. Design of adjustable road feeling performance for steering-by-wire system [J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2018, 2 (10-02-02-0008): 121-134.

[6] 赵林峰, 从光好, 邵文彬, 等. 线控转向车辆转向盘转矩特性研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (24): 138-146.

[7] ODENTHAL D, BÜNTE T, HEITZER H D, et al. How to make steer-by-wire feel like power steering [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2002, 35 (1): 187-192.

[8] 郑宏宇, 宗长富, 何磊, 等. 基于电动助力转向的线控转向汽车路感反馈控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43 (01): 1-5. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb2013.01.043.

[9] 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.

[10] Pacejka H. Tire and Vehicle Dynamics [M], Oxford, U. K.: ButterworthHeinemann, 2012.

[11] 赵尚煜. 基于 GPS/INS 车载组合导航技术的自动驾驶轨迹跟踪控制算法研究 [D]. 吉林大学, 2020. DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006284.