DOI: 10.3901/JME.2019.16.148

低附着路面条件的线控转向系统路感模拟 与回正控制研究*

谢有浩^{1,2} 赵林峰³ 陈无畏³ 刘彦琳³

(1. 滁州学院机械与电气工程学院 滁州 239000;

2. 安徽猎豹汽车有限公司 滁州 239064;

3. 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009)

摘要: 线控转向取消转向盘与转向车轮之间的机械连接, 车辆转向阻力矩无法直接反馈给驾驶员。在分析传统车辆路感产生原理的基础之上, 利用电流传感器测得的转向电机电流来等效路面负载, 实现对线控转向系统路感的自行设计。通过建立线控转向系统模型并利用回正力矩信息, 考虑车辆自回正力矩在低附着路面上会显著降低的特点, 提出一种新的回正控制策略, 该策略运用扩展卡尔曼滤波算法, 对路面附着系数进行估计, 并根据不同的路面附着系数来设计不同的回正电流, 以使得所设计的线控转向系统在各种路面上都具有较好的回正性能。最后, 对所提出的方法进行仿真和硬件在环试验分析, 其结果表明, 所设计的路感能够很好地满足驾驶员的操纵需求, 并且所设计的回正控制策略在低附着系数路面上能够明显改善驾驶员对路感的感知。

关键词: 线控转向; 电流传感器; 路面附着系数; 回正控制

中图分类号: U463

Road Feel and Return Control on Low Friction Coefficient Road for Steer-by-wire Vehicles

XIE Youhao^{1,2} ZHAO Linfeng³ CHEN Wuwei³ LIU Yanlin³

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000;

2. Anhui Leopard Automobile Co., Ltd., Chuzhou 239064;

3. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Since the partial mechanical connections between the steering wheel and the front wheels are cancelled in the steer-by-wire(SBW) system, the steering resistance torque of vehicle can't be directly feedback to the driver. Based on the analysis of the generation principle of the traditional vehicle road feeling, the steering motor current measured by current sensor is used to be as equivalent the road load, and the self-design of road feeling of SBW is realized. By establishing the model of SBW and utilizing the information of the self-aligning torque, considering that the self-aligning torque of vehicle will decrease significantly on low friction coefficient road, a new returning control strategy is proposed, which uses the extended Kalman filter algorithm to estimate the road adhesion coefficient, and designs different return current according to different road adhesion coefficient, so as to make sure that the designed SBW system has good return ability on all kinds of pavement. Finally, the simulation and the hardware-in-the-loop test are implemented to verify the method, the results show that the designed road feeling satisfy the driver's handling needs well. The returning control strategy proposed in this paper greatly improves the driver's perception of road feeling on low friction coefficient road.

Key words: steer-by-wire; current sensor; road adhesion coefficient; return control

* 安徽省科技重大专项(17030901060)、江苏省道路运输工具新技术应用重点实验室开放课题(BM20082061703)和国家自然科学基金(51675151, 61673154)资助项目。20181106 收到初稿, 20190620 收到修改稿

0 前言

线控转向系统(Steer-by-wire, SBW)通过线束将电子控制单元(Electronic control unit, ECU)的指令传递给转向执行机构,完成驾驶员的操纵指令,实现其转向意图。由于 SBW 系统转向盘和转向器之间无机械连接这一特殊结构特点,导致驾驶员无法通过转向盘感知车辆行驶时的路感信息,因此,需要采用路感电机来模拟转向盘阻力矩。

目前,SBW 系统的路感模拟方法分为三类,即传感器测量法、动力学计算法和参数拟合法。文献[1]中通过在车轮转向电机上安装电流传感器,通过算法估计出前轮转动时路面反作用力,将其作为模拟路感的转向盘阻力矩,并通过连接在转向盘轴上的路感模拟电机反馈给驾驶员。此方法得到的路感虽然简单,但波动较大,易导致转向盘抖动。文献[2]分析前后轮侧偏刚度、轮胎拖距、主销后倾角以及整车参数等参数对路感产生的作用,计算得到由它们产生的转向反馈力矩。驾驶者对该方法得到的路感较为适应,但轮胎力特性和拖距参数难以获得。文献[3]选取与路感高度相关的参数,将路感分解为各个模块,再将各模块力矩加权拟合,求得目标路感模拟力矩。该方法满足车辆低速转向轻便性的要求和具有高速路感清晰的优点,但由于其与传统转向系统路感存在一定差异而导致驾驶员有较重的适应负担。文献[4]通过将高低速行驶工况下的转向盘操纵转矩 MAP 图作为路感模拟控制目标力矩的依据。该方法路感模型较为理想,与实际驾驶路感存在一定的偏差。文献[5]在分析转向盘操纵转矩影响因素的基础之上,建立考虑摩擦力矩、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汽车转向盘操纵转矩的模型,选取车速、侧向加速度等与路感信息相关的变量,拟合出各模块力矩。但回正速度略显迟缓,在力矩急剧变化时有轻微的冲击感。文献[6]提出一种基于磁流变液的旋转式阻尼装置,通过调节电流值改变磁场强度并影响磁流变液的黏度,进而改变驾驶员转动转向盘时受到的反馈阻力,以实现线控转向中的力反馈功能,磁流变装置具有反应灵敏、力矩可调等优点。但磁流变液存在密封要求高、力学特性不易控制等缺点。文献[7]分析整车状态及路面附着与车辆回正力矩之间的相关性,运用卡尔曼滤波方法估计转向时转向负载传递到齿轮齿条上的作用力,得到的路感较为清晰。但是文中没有对路感工况进行判断,缺少对回正过程的控制。文献[8]将转向工况分为转向过程

与回正过程,对路感进行了分层控制,但是未考虑低路面附着工况对回正过程的影响。

文献[9]将无迹卡尔曼滤波观测器估计出的路面附着系数作为系统输入,设计基于滑模变结构方法的路感控制策略提高车辆在低附着路面的操纵稳定性和路感。但是传统滑模控制器会造成抖动,影响操纵手感。文献[10]采用一种积分校正的自适应平方根容积卡尔曼滤波器对变量进行估计,该方法可以根据系统状态自适应地调整控制参数,并通过阻尼项和零点复位方法校正积分估计,从而补偿估计误差。但该方法要求量测噪声的先验统计信息为已知,在存在量测噪声统计特性具有不确定性的情况下,该方法会出现滤波精度下降甚至发散的不足。

本文通过对传统转向系统路感来源进行分析,利用测量转向电机电流实现对车轮回正力矩的估计;运用卡尔曼滤波算法实现路面附着系数的识别,基于车轮回正力矩信息,对低附着系数条件下的回正控制策略进行设计,进行仿真验证。利用 LabVIEW PXI 平台,搭建 SBW 系统硬件在环仿真平台,对本文所提出的方法进行硬件在环试验验证,试验结果和仿真结果基本吻合。

1 SBW 系统动力学模型

SBW 系统主要包括转向盘总成、主控制器和转向执行总成三个部分,此外还包括一些辅助系统,如故障诊断系统等。SBW 系统组成示意图见图 1,确定上述组成部分的动力学方程,并建立车辆 SBW 系统动力学模型。

图 1 SBW 系统示意图

1.1 转向盘总成

转向盘至转矩传感器模型

$$T_w = J_w \ddot{\theta}_w + B_w \dot{\theta}_w + k_c (\theta_w - \theta_m / g_m) + T_f \quad (1)$$

式中, T_w 为驾驶员输入力矩; J_w 为转向盘转动惯量; θ_w 为转向盘转角; B_w 为转向盘阻尼系数; k_c 为转向柱扭转刚度; g_m 为路感模拟电机减速器减速比; θ_m 为路感电机转角; T_f 为转向盘总成内部摩擦力矩。

路感电机模型

$$T_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + \frac{k_c(\theta_m / g_m - \theta_w)}{g_m} \quad (2)$$

路感电机电学平衡方程

$$U_a = R_a I_a + L_a \dot{I}_a + k_e \dot{\theta}_m \quad (3)$$

电机电磁力矩

$$T_m = k_t I_a \quad (4)$$

式中, B_m 为路感电机阻尼系数; T_m 为路感电机电磁力矩; J_m 为路感电机转动惯量; k_t 为路感电机电磁力矩系数; I_a 为路感电机电流; U_a 为路感电机电压; L_a 为路感电机电感; R_a 为路感电机电阻; k_e 为路感电机反电动势系数。

1.2 转向执行总成

转向模块模型

$$T_e = J_e \ddot{\theta}_e + B_e \dot{\theta}_e + \frac{k_f(\theta_e / g_f - x_r / r_p)}{g_f} \quad (5)$$

转向电机电学平衡方程

$$U_e = R_e I_e + L_e \dot{I}_e + k_e \dot{\theta}_e \quad (6)$$

电机电磁力矩方程

$$T_e = k_g I_e \quad (7)$$

式中, T_e 为转向电机电磁力矩; J_e 为转向电机转动惯量; θ_e 为转向电机转角; B_e 为转向电机阻尼系数; k_f 为转向执行总成扭转刚度; g_f 为转向电机减速器减速比; x_r 为齿条位移; r_p 为小齿轮分度圆半径; U_e 为转向电机电压; I_e 为转向电机电流; R_e 为转向电机电阻; L_e 为转向电机电感; k_e 为转向电机反电动势系数; k_g 为转向电机电磁力矩系数。

齿轮齿条转向器模型

$$M_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r + F_r = \frac{k_f(\theta_e / g_f - x_r / r_p)}{r_p} \quad (8)$$

$$F_r = \frac{T_l}{l_l} + \frac{T_r}{l_r} \quad (9)$$

式中, M_r 为齿轮齿条质量; B_r 为齿轮齿条阻尼系数; F_r 为等效到齿条上的阻力; T_l 为左前轮主销回正力矩; T_r 为右前轮主销回正力矩; l_l 为左前轮转向摇臂长度; l_r 为右前轮转向摇臂长度。

2 路感模拟控制算法

2.1 反馈力矩

SBW 转向执行总成中电机的输出转矩等效处理为转向时克服的负载, 因此转向盘路感中路面信息主要由转向电机的输出转矩构成。转向时, 转向电机的电流值通过算法可用来描述轮胎特性、回正力矩以及路面附着情况。本文路感反馈力矩分析如图2所示。

图2 路感反馈力矩分析

车辆转向时, 按照驾驶员转向指令转向电机工作, 其驱动部分将产生相应的电流, 而此电流与转向电机负载成线性关系如下

$$T_e = k_g I_e \quad (10)$$

在式(10)中, 电流信号值主要决定于作用在转向电机轴上的转矩或负载大小, 这也是传统液压系统和电动助力转向系统的路感来源。由上述对路感的分析可初步建立路感模拟力矩方程, 即

$$T_d = G_f(T_e - T_a) \quad (11)$$

式中, G_f 为路感增益; T_d 为转向盘反馈力矩; T_a 为转向系统助力控制力矩。

对传统电动助力转向系统控制策略分析可知, 在设计助力力矩时, 一般随车速和转向盘转角的变化而变化, T_a 可表示为

$$T_a = K_a \theta_w^2 - \text{sgn}(\dot{\theta}_w) K_v v \quad (12)$$

式中, K_a 为转向盘转角增益; K_v 为速度增益; v 为车速。

2.2 阻尼控制力矩

高速行驶时, 为减少驾驶员误操作引起的车辆

失稳现象以及提高车辆的回正性能，应对其进行阻尼控制。一般可认为阻尼控制力矩 T_p 与转向盘角速度成比例关系，角速度越大则 T_p 越大，并且 T_p 的值应随着车速的增加而增大^[8,11]，即

$$T_p = C_p(v) \cdot \dot{\theta}_w \quad (13)$$

$$C_p(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_1 \\ k_p(v - v_1) & v > v_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中， k_p 为阻尼调节系数； $C_p(v)$ 为车速的函数，当车速大于 v_1 时阻尼控制力矩起作用； $\dot{\theta}_w$ 为转向盘角速度。

当驾驶员撒手时，阻尼控制还可较好避免因回正引起的回正超调和抖动现象。

2.3 限位控制力矩

限位控制主要是对转向盘可转动的最大角度进行控制。驾驶员在操纵传统转向系时，可通过相关机械连接，来准确地判断转向盘允许转过的最大角度，因此，在 SBW 系统中则需要重新设计限位装置。为了使 SBW 系统具有角传动比自由设计的特点和不增加成本，本文设计了当转向盘到达所设定的极限位置时的限位控制力矩 T_s ，即

$$T_s = \begin{cases} k_s(|\theta_w| - \theta_s) & |\theta_w| > \theta_s > 0 \\ 0 & |\theta_w| \leq \theta_s \end{cases} \quad (15)$$

式中， k_s 为限位控制力矩系数； θ_s 转向盘左、右转角的极限位置。

2.4 摩擦力矩

因没有了机械连接，在 SBW 车辆中，驾驶员能够直接感受到的摩擦力矩 T_f 只存在于转向盘模块当中。由于转向盘模块的制造和装配过程不可避免地存在不一致性，所以该摩擦力矩并不确定，一般来说该值较小且近似常数，用 τ_s 表示。根据文献[12]的方法，将 T_f 设计为

$$T_f = \begin{cases} \tau_s \frac{v}{80} & v \leq 80 \text{ km/h} \\ \tau_s & v > 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (16)$$

综上，转向盘反馈力矩可表示为

$$T_d = G_f(k_s I_e - T_a) + T_p + T_s + T_f \quad (17)$$

3 控制策略设计

根据上述对路感的分析设计可知，车辆在回正过程中，转向执行电机的电流值很大程度上反映了路面附着情况，可以利用该信息设计相应的转向盘回正控制策略。在相同车速下，装配有 SBW 的车

辆在高附着路面时，因轮胎自回正力矩较大车辆回正能力较强；反之，轮胎自回正力矩下降将导致车辆回正变差，仿真结果如图3所示。为使本文所设计的转向盘模块在不同路面附着情况下都有较好的转向盘回正性能，本文设计了基于路面附着系数的转向盘回正控制策略。

图3 相同车速不同附着系数条件下前轮自回正力矩

3.1 路面附着系数估计

在这里，采用文献[13]的方法进行路面附着系数估计，首先结合 SBW 系统动力学模型，建立车辆 2 自由度动力学模型

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{1}{mv}(F_1 + F_2) - \omega_r \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{I_z}(aF_1 - bF_2) \end{cases} \quad (18)$$

式中， β 为质心侧偏角； F_2 为后轮侧向力； m 为整车质量； F_1 为前轮侧向力； a 、 b 分别为质心到前后轴的水平距离； ω_r 为横摆角速度； I_z 为整车绕垂直轴转动惯量。

根据动力学关系得出前后轮侧偏角和整车侧向加速度

$$\begin{cases} \alpha_1 = \beta + \frac{a\omega_r}{v} - \delta \\ \alpha_2 = \beta - \frac{b\omega_r}{v} \end{cases} \quad (19)$$

$$a_y = \frac{1}{m}(F_1 + F_2) \quad (20)$$

式中， α_1 和 α_2 分别为车辆前、后轮侧偏角； δ 为前轮转角； a_y 为侧向加速度。

分三步^[14]对路面附着系数进行估计，先建立系统参数和测量方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_s(t), \mathbf{x}_p(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{w}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_s(t), \mathbf{x}_p(t), \mathbf{v}(t)) \end{cases} \quad (21)$$

式中, $x_p(t)$ 为参数变量; $w(t)$ 为过程噪声; $u(t)$ 为控制变量; $y(t)$ 为输出; $x_s(t)$ 为状态变量; $v(t)$ 为测量噪声。

随后, 建立参数预测方程

$$\begin{cases} \hat{x}_p(t) = \hat{x}_p(t-1) \\ \Phi_p(t) = \Phi_p(t-1) + P_p \end{cases} \quad (22)$$

式中, $\Phi_p(t)$ 和 P_p 均为协方差矩阵。

最后是进行参数修正, 其方程为

$$\begin{cases} K_p(t) = \Phi_p(t)H_p^T(R_p + H_p\Phi_p(t)H_p^T)^{-1} \\ \hat{x}_p(t) = \hat{x}_p(t) + K_p(t)(y(t) - H_s\hat{x}_s(t)) \\ \Phi_p(t) = (I - K_p(t)H_p)\Phi_p(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中, R_p 为测量噪声协方差对参数变量的偏导数的雅克比矩阵; H_p 为测量输出对参数变量的偏导数的雅克比矩阵; H_s 为测量输出对状态变量的偏导数的雅克比矩阵, H_p 和 H_s 具体可表示为

$$H_p = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_{p1}} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{pk}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_{p1}} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial x_{pk}} \end{pmatrix}, \quad H_s = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_{s1}} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{sm}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial y_n}{\partial x_{s1}} & \dots & \frac{\partial y_n}{\partial x_{sm}} \end{pmatrix}$$

结合上述方程, 待估计的状态和参数为

$$x_s(t) = (\alpha_1, \alpha_2) \quad x_p(t) = \hat{\mu} \quad (24)$$

式中, $\hat{\mu}$ 为路面附着系数估计值。

由于对路面附着系数的估计会受到轮胎侧偏角非线性的影响, 为保证参数和状态的估计精度, 这里引入整车的回正力矩信息。

联立转向电机模型和 SBW 系统模型计算转向电机有效电流

$$I_v = I_e - \frac{J_e}{k_g g_f} \quad (25)$$

则可得 SBW 转向系统动力学模型

$$I_v k_g g_f + T_M = J_e \ddot{\theta}_e + B_e \dot{\theta}_e \quad (26)$$

式中, T_M 为回正力矩。

式(25)中电流 I_e 由电流传感器测得, 回正力矩 T_M 可由式(26)计算得到, 并且其与前轮转角有密切的关系。因此, 所估计的状态参数变为

$$x_s(t) = (\alpha_1, \alpha_2, T_M) \quad x_p(t) = \hat{\mu} \quad (27)$$

式中, 控制输入 $u(t) = (\delta)$; 测量输出 $y(t) = (a_y, T_M, \dot{\phi})$ 。

3.2 回正控制策略

为了避免和传统转向系统混淆, 本文将驾驶者

松手后转向盘模块中的转向盘运动过程称之为转向盘主动回正, 手握转向盘操作为转向。

回正力矩将车辆处于转向过程中的路面信息及时反馈给驾驶员, 可通过修改路感增益 G_{feel} 来调整反馈力矩大小。

当在低附着路面上自回正时, 由于轮胎自回正力矩不足以克服各种摩擦阻力, 包括路面与车轮间、转向电机及减速机构、齿轮齿条以及各部件的摩擦力和摩擦力矩, 导致车辆回正性能变差。文献[13]将滑模控制应用于回正控制, 较好地解决了这一问题, 获得了良好的效果。但传统滑模控制器的抖振, 会导致 SBW 车辆回正时手感变差。为了解决传统滑模控制的这一不足, 本文将采用通过减小切换增益来消除抖振的时变滑模控制方法, 使系统很好地在设定时刻处在滑模面上, 消除传统滑模控制的趋近模态, 并且基于路面附着系数来设计回正电流, 当在低附着路面条件下可得较高回正电流, 提高车辆的回正性能。

令

$$\begin{cases} e = \theta_w - \theta_d \\ \dot{e} = \dot{\theta}_w - \dot{\theta}_d \end{cases} \quad (28)$$

式中, e 为误差; θ_d 为转向盘目标转角位置。

文献[15]对 3 种时变滑模面进行了仿真试验, 变斜率滑模面较其他两种方法效果更好, 可表示为

$$s = \begin{cases} \dot{e} + (At + B)e & t \leq t_f \\ \dot{e} + \lambda e & t > t_f \end{cases} \quad (29)$$

式中, $A = \left(\lambda + \frac{\dot{e}_0}{e_0} \right) / t_f$, $B = -\frac{\dot{e}_0}{e_0}$, λ 、 t_f 为常数; e_0 、 $\dot{e}_0$ 为 $t=0$ 时刻的 e 、 $\dot{e}$ 的值, 且 $\lambda > 0$ 、 $t_f > 0$ 。

由式(2)可得路感电机电磁力矩 T_m 的估计值 $\hat{T}_m$, 则

$$\hat{T}_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + k_c(\theta_m / g_m - \theta_{sw}) \quad (30)$$

而

$$\begin{aligned} T_m &= \hat{T}_m + \Delta T_m \quad |\Delta T_m| \leq \Delta T_{\max} \\ J_m &= J_0 + \Delta J \quad \Delta J_{\min} \leq \Delta J \leq \Delta J_{\max} \end{aligned} \quad (31)$$

式中, ΔT_m 为 T_m 的不确定值; ΔJ 为 J_m 的不确定值; J_0 为 J_m 的确定值; $\Delta T_{\max}$ 为 ΔT_m 上限值; $\Delta J_{\min}$ 、 $\Delta J_{\max}$ 为 ΔJ 上、下限值。

对式(29)中的 s 进行求导, 得

$$\dot{s} = \begin{cases} \ddot{e} + (At + B)\dot{e} + Ae & t \leq t_f \\ \ddot{e} + \lambda \dot{e} & t > t_f \end{cases} \quad (32)$$

由式(26)得等效控制律

$$I_v =$$

$$\begin{cases} (J_m \ddot{\theta}_d - J_m (At+B) \dot{e} - J_m Ae + B_m \dot{\theta}_m + C)/k_g & t \leq t_f \\ (J_m (\ddot{\theta}_d - \lambda \dot{e}) + B_m \dot{\theta}_m + C)/k_g & t > t_f \end{cases} \quad (33)$$

则回正时的电机电流

$$I_r = (2 - k_\mu \hat{\mu}) \left(I_v - \frac{J_m \kappa}{k_t g_m} \operatorname{sgn}(s) \right) \quad \kappa > 0 \quad (34)$$

式中, k_μ 为 $\hat{\mu}$ 的增益, 为经验值。

定义 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (35)$$

由 Lyapunov 稳定性定理知, 当 $\dot{V} = s\dot{s} \leq -\eta |s|$ (其中 $\eta > 0$) 时, 系统稳定, 得

$$\dot{V} = -s \frac{\kappa}{\Delta J} \operatorname{sgn}(s) + sf(\Delta J, \Delta T_m) \quad (36)$$

式中, $f(\Delta J, \Delta T_m) =$

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{1}{\Delta J}\right) [(At+B) \dot{e} + Ae - \ddot{\theta}_d] - \frac{1}{J_0 \Delta J} (\Delta T_m + \Delta C \dot{\theta}_m) & t \leq t_f \\ \left(1 - \frac{1}{\Delta J}\right) (\lambda \dot{e} - \ddot{\theta}_d) - \frac{1}{J_0 \Delta J} (\Delta T_m + \Delta C \dot{\theta}_m), & t > t_f \end{cases}$$

显然 $f(\Delta J, \Delta T_r)$ 有界。

当 $\Delta J = \gamma_{\max}$, $\Delta f_{\max} = \|f(\Delta J, \Delta T_r)\|_{\infty} \sqrt{b^2 - 4ac}$ 。
 $\kappa = \gamma_{\max} (\Delta f_{\max} + \eta)$, 这样满足 Lyapunov 稳定性判据。

采用式(37)的饱和函数 $\operatorname{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)$ 来代替式(34)中的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$, 以达到削弱系统抖振的目的

$$\operatorname{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} 1 & s > \varepsilon \\ s/\varepsilon & -\varepsilon \leq s \leq \varepsilon \\ -1 & s < -\varepsilon \end{cases} \quad (37)$$

式中, ε 为边界层厚度。

4 仿真分析

基于上述分析, 在 CarSim 中选取不同工况与 matlab/simulink 联合仿真进行分析。本文首先对所估计路面附着系数的精确度进行验证, 随后以路面附着系数 μ 为 0.3, 在低、中、高车速下进行双纽线试验, 同时进行了回正性能试验。针对本文所建立的模型, 对车速进行如下划分

$$\begin{cases} v \leq 20 \text{ km/h} & \text{低速} \\ 20 \text{ km/h} < v \leq 80 \text{ km/h} & \text{中速} \\ v > 80 \text{ km/h} & \text{高速} \end{cases} \quad (38)$$

仿真中用到的相关参数如表 2 所示。

4.1 路面附着系数估计

为验证本文回正控制策略的有效性, 首先要验

表 2 仿真参数表

参数	数值
整车质量/g	1 255
横摆转动惯量/(kg · m ²)	2 056.2
前轮到质心的距离/m	1.01
后轮到质心的距离/m	1.55
前轮侧偏刚度/(N/rad)	-43 851.69
后轮侧偏刚度/(N/rad)	-32 792.79
转向盘转动惯量/(kg · m ²)	0.029
转向盘阻尼系数/(N · m · s/rad)	0.361
转向柱扭转刚度/(N · m/rad)	135
路感电机减速器减速比	4
路感电机转动惯量/(kg · m ²)	0.000 54
路感电机阻尼系数/(N · m · s/rad)	0.000 09
路感电机电阻/Ω	0.345
路感电机电感/H	0.000 238
路感电机反电动势系数/(V · s/rad)	0.050 6
路感电机电磁力矩系数/(N · m/A)	0.050 6
转向电机转动惯量/(kg · m ²)	0.000 87
转向电机阻尼系数/(N · m · s/rad)	0.000 21
转向电机电阻/Ω	0.42
转向电机电感/H	0.000 34
转向电机反电动势系数/(V · s/rad)	0.065
转向电机电磁力矩系数/(N · m/A)	0.065
转向执行总成扭转刚度/(N · m/rad)	176
转向电机减速器减速比	16.5
小齿轮分度圆半径/m	0.007
齿轮齿条质量/kg	2.25
齿轮齿条阻尼系数/(N · m · s/rad)	653
左/右前轮转向摇臂长度/m	0.138
转向盘转角增益	0.3
速度增益	1
路感增益	1

证所估计路面附着系数的精确度。选取中心区和角阶跃试验工况, 在 CarSim 中设置路面附着系数为 0.85, 试验时车速为 80 km/h, 同时为了验证不同初始值估计方法的有效性, 将两种工况的路面附着系数初始值分别设为 0.5 和 0.55。仿真结果如图 4 所示。从图中可以看出, 由式(27)所估计的路面附着系数与 CarSim 内设定值较吻合, 为下一步的回正控制奠定了基础。

4.2 转向盘操纵转矩

分别以车速为 10 km/h、40 km/h、80 km/h 进行转向轻便性试验, 选取双纽线仿真工况, 路面附着系数设置为 0.3, 在采用不同控制算法情况下, 观察转向盘操纵转矩随转角变化的趋势。低、中、高车速仿真结果如图 5~7 所示。从图 5 中可以看出, 低速下转向盘操纵转矩变化平稳, 很好地实现车辆

(a) 中心区试验路面附着系数估计

(b) 角阶跃试验路面附着系数估计

图4 中心区试验和角阶跃试验工况下路面附着系数仿真结果

的转向轻便性;从图6可以看出,转向盘操纵转矩的变化呈明显折线型,给驾驶员更丰富的手感;从图7可以看出,转向盘操纵转矩急剧增加,因为高速时转向盘转角转动范围较小,转矩随转角变化的斜率的急剧增大,提醒驾驶员减少误操作,满足车辆在高速工况下路感清晰的要求。

图5 $\mu=0.3$, 10 km/h 时转向盘操纵转矩 图6 $\mu=0.3$, 40 km/h 时转向盘操纵转矩 图7 $\mu=0.3$, 80 km/h 时转向盘操纵转矩

在相同的仿真工况下,从仿真结果可以看出,与文献[16]所提出的方法相比,随着车速增加,在转向操纵中,转向盘操纵转矩随着转向盘转角的增加,明显变小,转向路感提高;而在往转向盘中间位置操纵过程中,转向盘操纵转矩明显变化,提示驾驶员此时路面附着系数较低,以改善低路面附着系数条件下驾驶员对路感的感知。

在相同仿真工况下,可通过调整路面附着系数估计值 $\hat{\mu}$ 的增益 k_{μ} 来改善手感。由图8和图9可知,在2到3范围内,随着增益 k_{μ} 越小,对应转向盘回正作用力矩就越大,转向盘回正性能提升;且在此范围内,低附着路面工况下, k_{μ} 的取值对转向盘回正作用力矩明显提高,而在高附着路面工况下, k_{μ} 的值对回正力矩的影响较小,因此低附着路面条件下车辆的回正性能得到很好地改善。当 k_{μ} 取值小于2时,导致转向盘回正作用力矩增加,此时会明显对操纵手感有很大影响,且导致转向盘回正超调。而当 k_{μ} 的值超过3时,转向盘操纵转矩产生畸变从而导致操纵手感变差。

图8 $\mu=0.3$ 时 k_μ 对路感的影响 图9 $\mu=0.85$ 时 k_μ 对路感的影响

4.3 限位控制

根据已公开的资料,将线控转向系统转向盘转角极限值设为 360° ,取 $k_s = 0.15 \text{ N}\cdot\text{m}/(^\circ)$ 。原地和低车速(小于 10 km/h)工况,以周期为 5 s 、幅值为 370° 的转向盘正弦输入来进行仿真。仿真结果如图 10 所示。

图10 原地转向限位控制试验仿真结果

从图 10 中可以看出,当转角在 300° 范围内时,转向盘操纵转矩呈平滑曲线型变化,改善因转向盘转角急剧增加而产生的突兀感;一旦转向盘转角大于 360° 时,此时转向盘转矩会急剧增大以达到提醒驾驶员已达到转向极限位置。

4.4 回正性能

为验证本文所设计的回正控制策略对车辆回正性能的影响,进行了回正性能仿真试验。路面附着系数设置为 0.6 ,车速设为 40 km/h ,转向盘转角设定成 95° ,当车辆进入稳态回转工况后,驾驶员松开转向盘,并与采用其他回正控制方法的回正性能(主要从回正时间及回正残余角)进行比较。仿真结果如图 11 所示。从图中可以看出,本文所采用的回正控制策略使线控转向车辆的回正时间缩短,对其回正性能有了较大的改善,提高了驾驶员的操纵路感。

图11 μ 为 0.6 时回正性能

μ 为 0.3 时,仿真结果如图 12 所示,与图 11 仿真结果比较可看出,在低附着路面条件下,回正时间延长较为明显。相较于参数拟合法,转向盘回正速度显著改善,且转向盘残余角小于 5° ;而相较于传统滑模控制趋势更平稳。本文所提出的回正控制策略能够明显改善 SBW 系统转向盘的回正性能,提高了驾驶员在低附着路面对路感的感知。

图12 μ 为 0.3 时回正性能

5 硬件在环试验

为了进一步验证和评估所提出的路感模拟控制

算法和回正控制策略的有效性,搭建了基于 CarSim 整车模型和 LabVIEW 数据采集处理的硬件在环试验台。

该试验台集成自行开发的转向机器人、转向负载模拟机构、开发的 SBW 控制器、改制的转向盘总成模块、改制的转向齿条机构、运行整车模型的上位机、支持实时仿真功能的 PXI 主机、数据采集卡和各类传感器等。

为保证硬件在环试验的可对比性和重复性,采用转向机器人实现各个工况转向盘转角输入。转向机器人以伺服电机为主体,通过卡爪连接转向盘总成,通过上位机发出的指令控制转向盘转角。为了实现阻力的真实模拟,台架还包括伺服电机组成的转向负载模拟机构,其工作原理为利用 CarSim 输出齿条受力信息给上位机,经计算后再由伺服电机控制器输出指令至伺服电机,通过滚珠丝杠机构模拟转向拉杆负载力矩给齿轮齿条转向器,来实现对转向负载的模拟。

在上位机中,采用 CarSim 整车动力学仿真软件,根据表 2 中的参数来建立整车模型和虚拟道路;运用 LabVIEW 软件,编写程序处理和显示各路传感器信号,下载到 PXI 主机执行;同时,利用数据采集卡和 CAN 通信接口系统采集车速、转向盘转角、转向盘转矩、电机电流、路面附着系数和整车状态等参数,并将相关参数实时发送给 SBW 控制器和 PXI 主机,实现信息的实时交互。硬件在环试验台如图 13 所示。

图 13 SBW 硬件在环试验台

5.1 转向盘操纵转矩

硬件在环试验在 CarSim 中车速设为 10 km/h,路面附着系数设为 0.3,进行试验时,驾驶员操纵转向盘使车辆按照 CarSim 中设定好的双纽线路径行驶。试验结果如图 14 所示。

图 14 μ 为 0.3 时转向盘操纵转矩

从图 14 可以看出,参数拟合法与本文回正控制策略得出的转向盘操纵转矩随转向盘转角的变化趋势基本一致,且本文得到的力矩变化趋势更为平稳,较好地改善力矩急剧变化产生的冲击感。回正性能得到了较明显的改善。

5.2 限位控制

选择原地转向工况,进行试验时驾驶员操作转向盘往返转动至 360° 以上,试验结果如图 15 所示。

图 15 原地转向限位控制试验硬件在环试验结果

从试验结果可以看出,转向盘转角在 360° 以内,力矩变化平稳,不会有较大异值的出现。当转向盘转角大于 360° 时,力矩呈现急剧增加趋势,提示驾驶员此时已到极限位置,防止驾驶员的过操作。

5.3 回正性能

图 16 为 SBW 硬件在环回正性能试验结果与仿真图 12 相比可以看出,二者趋势一致,与参数拟合法相比较,在低路面附着条件下加入回正控制后,回正时间更短,残余角在 5° 左右,处于合理范围,回正性能得到了改善。

图 16 μ 为 0.3 时回正性能

6 结论

(1) 在分析传统电动助力转向系统助力控制方法的基础上,建立了将线控转向系统转向电机转矩等效为所克服转向负载的方法,以转向电机电流为参考,设计转向盘操纵转矩,使之更接近传统车辆的路感。

(2) 在建立 SBW 系统动力学模型和利用车轮回正力矩信息的基础之上,采用扩展卡尔曼滤波算法对路面附着系数进行在线估计,设计转向盘回正控制策略。仿真结果表明, k_{μ} 在 2 与 3 取值时,本文提出的回正控制策略能够使 SBW 车辆在低附着路面上的转向操纵路感和回正性得到明显改善。

(3) 搭建 SBW 硬件在环试验平台,试验验证所设计的路感反馈方法和 SBW 转向盘回正控制策略,使配备 SBW 的车辆具有低速行驶时的转向轻便性和高速行驶时的路感清晰的优点,克服了传统车辆转向系统的弊端,发挥了 SBW 车辆转向盘操纵转矩可以根据驾驶员的需求自由设计的优势。

参考文献

- [1] BAHAI N J R. Direct current measurement based steer-by-wire systems for realistic driving feeling[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2009: 1023-1028.
- [2] 苏延霞. 线控转向中路感控制系统设计及算法分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
SU Yanxia. The design and analysis of SBW road feeling control system[D]. Wuhan: Wuhan University Technology, 2013.
- [3] KIM C J, JANG J H, OHS K, et al. Development of a control algorithm for a rack-actuating steer-by-wire system using road information feedback[J]. Automobile Engineering, 2008, 48(9): 1559-1571.
- [4] 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, 2013, 43(1): 1-5.
ZHENG Hongyu, ZONG Changfu, HE Lei, et al. Road feel feedback control for steer by wire system based on electric power steering[J]. Journal of Jilin University, 2013, 43(1): 1-5.
- [5] 从光好. 线控转向路感模拟及传动比特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
CONG Guanghao. Research on simulation of steering-by-wire feeling and transmission ratio[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [6] 卢少波, 何耀斌, 胡林涛, 等. 磁流变线控转向力反馈装置的设计与优化[J]. 汽车工程, 2015, 37(12): 1412-1417.
LU Shaobo, HE Yaobin, HU Lintao, et al. Design and optimization of MR fluid-based force feedback device for steering-by-wire[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(12): 1412-1417.
- [7] 郑宏宇. 汽车线控转向路感模拟与主动转向控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
ZHENG Hongyu. Research on road feeling and active steering control strategy for vehicle steer-by-wire system[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [8] 吴瑾. 线控转向系统的路感控制策略研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
WU Jin. A study on road feeling control strategy for vehicle steer-by-wire system[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [9] 周兵, 田晨. 基于路面附着系数估计的 AFS 控制策略研究[J]. 湖南大学学报, 2017, 44(4): 16-22.
ZHOU Bing, TIAN Chen. Control strategy of AFS based on estimation of tire-road friction coefficient[J]. Journal of Hunan University, 2017, 44(4): 16-22.
- [10] CHENG S, LI L, CHEN J. Fusion algorithm design based on adaptive SCKF and integral correction for side-slip angle observation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5754-5763.
- [11] FANKEM S, MULLER S. A new model to compute the desired steering torque for steer-by-wire vehicles and driving simulators[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(Suppl.1): 251-271.
- [12] 王宁. 线控转向汽车路感模拟及主动转向控制策略研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2016.
WANG Ning. Study on road feeling and active steering control strategy for vehicle steer-by-wire system[D]. Shenyang: Liaoning University, 2016.
- [13] CHEN Bochiuan, HSU Weifeng, HUANG Shiuhjer. Sliding-mode return control of electric power steering[R].

- SAE, 2008-01-0499, 2008.
- [14] 胡丹. 基于双扩展卡尔曼滤波的汽车状态及路面附着系数估计算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- HU Dan. Research on the vehicle state and road tire friction coefficient estimation based on dual extended kalman filter[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [15] JIN Yongqiang, LIU Xiangdong, QIU Wei, et al. Time-varying sliding mode controls in rigid spacecraft attitude tracking[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008(21): 352-360.
- [16] JIANG Y, DENG W, ZHANG S, et al. Modeling and

verification of steering torque feedback system for driving simulator[C]// IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2014.

作者简介: 谢有浩, 男, 1975 年出生, 教授级高工。主要研究方向为汽车智能化和制造技术。

E-mail: cfyzxyh@163.com

赵林峰(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为动力学与技术。

E-mail: zhao.lin.feng@163.com

陈无畏, 男, 1951 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: hfgdcjs@126.com