



线控转向汽车路感控制策略

谢立刚^{1,2} 陈 勇^{1,2}

(1. 北京信息科技大学 机电工程学院, 北京 100192;

2. 新能源汽车北京实验室, 北京 100192)

摘 要: 线控转向系统取消了转向盘与转向执行机构之间的机械连接, 路感由模拟产生。通过 Simulink 与 Carsim 平台, 建立线控转向汽车整车模型, 根据传统转向系统转向过程中产生转向阻力矩的原理, 利用动力学方法计算目标转向阻力矩。使用 PID 控制路感电机, 模拟转向阻力矩。根据 ISO13674 标准, 进行转向盘中间位置操纵稳定性试验。仿真结果表明, 粒子群优化 PID 可以更有效地实现路感反馈功能。最后, 与传统转向汽车实车试验对比, 证明了线控转向系统路感控制策略的有效性。

关 键 词: 线控转向; 粒子群算法; 路感电机

中图分类号: U463.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2022)04-0068-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

驾驶员在执行转向操作时, 通过方向盘得到车辆行驶中的转向阻力矩, 被称为路感^[1]。线控转向(steer-by-wire, SBW)系统取消了方向盘与转向器之间的机械连接, 通过控制转向执行电机控制转向前轮, 达到转向的目的^[2]。然而取消机械部件连接, 在隔绝了路面对于转向盘组件的干扰外, 提升了驾驶员的驾车体验, 但同时也丧失了驾驶员对于行驶路况的感知, 线控转向系统通过路感电机来模拟产生转向阻力矩^[3]。

目前线控转向系统的路感反馈方面, 主要通过动力学模型计算^[4-6]和参数拟合^[7-8]两种方式模拟生成转向阻力矩。动力学模型计算方法是通过分析传统转向系统的路感产生原理, 利用轮胎侧向力即轮胎拖矩等参数, 建立动力学模型, 计算得到路感反馈力矩, 驾驶员易适应; 参数拟合选取方向盘转角、转角速度及车速等车辆状态参数, 进行函数拟合, 获得路感。Xiao 等^[9]对电动叉车线控转向系统的转向辅助力矩、阻尼、限位力矩进行综合控制。谢有浩等^[10]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

收稿日期: 2021-05-25

基金项目: 科技创新服务能力建设-北京实验室建设项目(PXM2020_014224_000065); 科技创新服务能力建设-北京实验室建设-新能源汽车北京实验室项目(PXM2019_014224_000005)

作者简介: 谢立刚, 男, 硕士研究生, 主要从事汽车系统动力学研究, E-mail: xlg09811@163.com; 通讯作者 陈勇, 男, 博士, 教授, 主要从事电动车辆系统动力学研究, E-mail: chenrong_jz@126.com。

本文引用格式: 谢立刚, 陈勇. 线控转向汽车路感控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(4): 68-74.

Citation format: XIE Ligang, CHEN Yong. Research on road feel control strategy of automobile with steering by wire[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2022, 36(4): 68-74.

附着系数来设计不同的回正电流,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。学者研究控制路感电机采用的方法多为PID控制,Zhou等^[11]采用扭矩、电流双闭环PID对路感电机进行控制;Tian等^[12]使用模糊PID控制路感电机产生转向阻力矩,模拟路感。胡延平等^[13]对路感阻力矩中的摩擦力矩将遗传算法和BP神经网络相结合,对非线性及个体化差异的固有摩擦力矩进行高精度逼近,进而计算目标反馈力矩。

设定模糊规则对人员的实际经验要求较高,以及遗传算法在进行到复杂工况求解时,计算量较大,耗时长。参数拟合需要大量的实验数据以及车辆参数,不易获取,针对以上问题,选取动力学模型计算的方式生成目标回正力矩,使用粒子群算法优化PID控制器,控制路感电机,模拟产生转向阻力矩,使驾驶员获得“路感”。

1 建立模型

SBW系统主要由方向盘总成、控制器(ECU)以及转向执行总成3部分构成^[14],结构简图如图1所示。基于Simulink搭建线控转向系统模型,与Carsim平台联合仿真构成线控转向汽车。

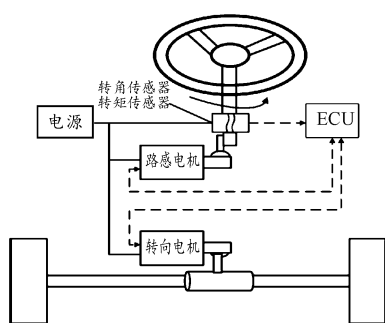


图1 线控转向系统结构示意图

文中主要研究路感反馈部分,便只罗列转向盘总成部分模型,主要包含转向盘、路感电机和减速机构3部分。

转向盘数学模型^[14]为:

$$J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} + B_{sw} \dot{\theta}_{sw} + K_s \left(\theta_{sw} - \frac{\theta_{ml}}{g_1} \right) + T_f = T_{sw} \quad (1)$$

式中: J_{sw} 为转向盘转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_{sw} 为转向盘阻尼, $\text{N} \cdot \text{m/s}$; K_s 为转矩传感器刚度, N/rad ; θ_{sw} 为转向盘转角, rad ; T_f 为转向盘摩擦力矩, N/m ; T_{sw} 为驾驶员输入力矩, N/m 。

路感电机数学模型为:

$$J_{ml} \ddot{\theta}_{ml} + B_{ml} \dot{\theta}_{ml} + K_s \left(\theta_{ml} / g_1 - \theta_{sw} \right) / g_1 = T_{ml} \quad (2)$$

式中: $T_{ml} = k_{ft} I_{ml}$; J_{ml} 为路感电机转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_{ml} 为路感电机阻尼, $\text{N} \cdot \text{m/s}$; θ_{ml} 为电机转角, rad ; g_1 路感电机减速比; T_{ml} 为路感电机电磁力矩, N/m ; k_{ft} 为电机电磁系数, $\text{N} \cdot \text{m/A}$ 。

路感电机电枢电压方程为:

$$U_l = R_{al} I_{ml} + L_{al} \dot{I}_{ml} + k_{fe} \dot{\theta}_{ml} \quad (3)$$

式中: R_{al} 为路感电机电阻, Ω ; L_{al} 为电机电感, H ; I_{ml} 为电机电流, A ; k_{fe} 为电机反电动势系数, $\text{N} \cdot \text{m/A}$ 。

2 路感反馈控制策略

2.1 目标转向阻力矩

传统转向系统的转向阻力矩主要由回正力矩与转向系统的摩擦力矩组成,然而轮胎回正力矩包括了由轮胎拖距以及轮胎定位引起的回正力矩。由轮胎拖距产生的回正力矩可以表示为轮胎侧向力与轮胎拖距的乘积,即:

$$M_z = F_y \cdot (r_\tau + r_m) \quad (4)$$

式中: 轮胎侧向力可以简化计算为汽车前桥质量 m_f 与侧向加速度 a_y 的乘积,即:

$$F_y = m_f a_y = m_f \frac{u^2}{R}$$

而转向半径 R 为:

$$R = \frac{u}{\omega_r} = \frac{(1 + Ku^2) L}{\delta_f}$$

稳定因数 K 为:

$$K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为前、后轮的总侧偏刚度, N/rad ; m 为汽车总质量, kg ; ω_r 为横摆角速度, rad/s ; a 为质心至前轴距离, m ; b 为质心至后轴距离, m ; L 为汽车轴距, m ; δ_f 为汽车前轮转角, rad 。

由轮胎定位(主销内倾)造成的回正力矩是汽车低速行驶时轮胎产生回正力矩的主要部分,表示为:

$$M_A = \frac{QD}{2} \sin 2\beta' \sin \delta_f \quad (5)$$

式中: Q 为轮胎载荷, N ; D 为主销内移量, m ; β' 为主销内倾角, $(^\circ)$ 。

那么由回正力矩引起的阻力矩 M_1 可以写成

$$M_1 = \frac{M_z + M_A}{i} \quad i \text{ 为转向系的力传动比。}$$

摩擦力矩^[9]可以写为:

$$T_f = \begin{cases} \tau_s \frac{v}{80} & v \leq 80 \text{ km/h} \\ \tau_s & v > 80 \text{ km/h} \end{cases} \quad (6)$$

式中: τ_s 为转向系统摩擦力矩, 取 $\tau_s = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

转向阻力矩 M 可以表示为 $M = M_1 + T_f$ 。

2.2 路感电机控制

线控转向系统中由通过控制路感电机模拟产生转向阻力矩。本文采用的工业中常用的 PID 控制, PID 控制器根据理想值 $r(t)$ 与实际值 $c(t)$ 构成的偏差 $e(t) = r(t) - c(t)$ 。通过比例、积分和微分加权组合控制, 对路感电机进行控制。其一般形式^[15]为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

对路感电机的控制过程如图 2 所示。

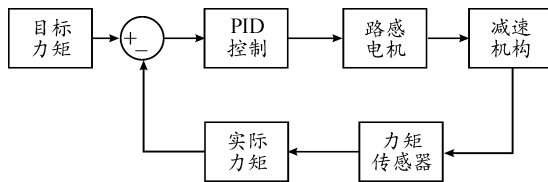


图2 路感电机控制过程框图

PID 控制器最主要的问题是参数的设定, 在调整 PID 参数时, 多数靠专家经验以及试凑的方法, 不仅费时, 而且不能保证获得最佳的性能。为解决此问题, 使用粒子群算法优化 PID 控制器。粒子群算法(particle swarm optimization, PSO) 源于对鸟类捕食行为的研究^[16], 与传统优化算法相比, 计算速度更快、全局搜索能力更强。PSO 优化 PID 控制器参数过程如图 3 所示。

常用的误差性能指标包括 ISE、IAE、ITAE、ISTE 等, 由于按 ITAE 准则设计的控制系统瞬态响应的震荡小^[17], 这里选用 ITAE 指标作为输出性能指标, 其定义为:

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (8)$$

粒子在搜索空间中的速度和位置根据以下公式确定:

$$v_{i+1} = \omega v_i + c_1 r_1 (P_i - x_i) + c_2 r_2 (G_i - x_i)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1}$$

式中: x 表示粒子的位置; v 表示粒子的速度; ω 为惯性因子; c_1 、 c_2 为加速常数; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, 用于增加粒子飞行的随机性; P_i 是粒子目前搜索到的最优位置; G_i 是整个粒子群目前搜索到的最优位置。

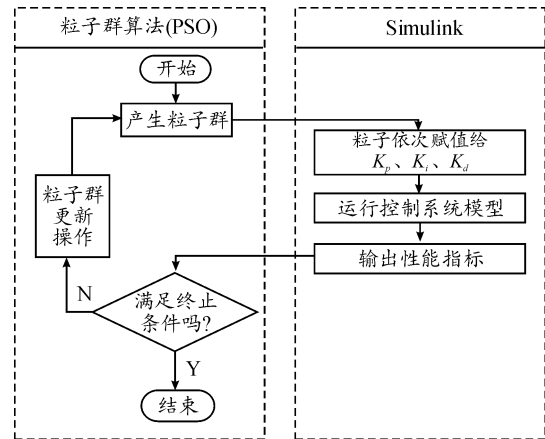


图3 PSO 优化 PID 的过程框图

3 仿真分析

利用 Simulink 与 CarSim 平台联合仿真构成的线控转向汽车, 进行仿真分析, 利用 CarSim 中车辆模型参数, 仿真部分参数见表 1。

表1 车辆仿真参数

参数	数值
总质量 m/kg	1 230
转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 343.1
轴距 L/m	2.60
质心至前轴距离 a/m	1.04
质心至后轴距离 b/m	1.56
前轮总侧偏刚度 $k_1/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-85 808
后轮总侧偏刚度 $k_2/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-112 732
主销后倾拖距 r_r/m	0.02
轮胎拖距 r_m/m	0.04
转向盘转动惯量 $J_{sw}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.002 96
转向盘阻尼 $B_{sw}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.21
转矩传感器刚度 $K_s/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	3.5

3.1 中间位置试验

根据 ISO13674 标准, 汽车以 100 km/h 的车速

做正弦曲线蛇形行驶, 正弦运动周期为 5 s, 最大侧向加速度为 0.2 g。方向盘转角输入如图 4 所示。

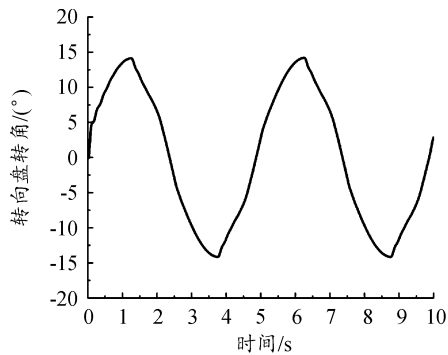


图 4 转向盘转角输入

在仿真过程中, 设置 PSO 的参数为: 惯性因子 $\omega = 0.6$, 加速常数 $c_1 = c_2 = 2$, 维数为 3, 粒子群规模为 100, 最大迭代次数为 100, 最小适应值为 0.1, 速度范围为 $[-1, 1]$ 。待优化参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的取值范围均为 $[0, 300]$ 。

为验证 PSO 优化 PID 控制器的效果, 选取通过试凑法确定参数的 PID 控制器以及同类型的寻优算法—遗传算法 (genetic algorithm, GA) 优化 PID 控制器作为比较对象, GA 参数设置为: 种群大小为 100, 精英个数为 10, 交叉后代比例 0.6, 变异函数为约束自适应变异, 最大进化代数 100, 适应度函数偏差为 1×10^{-100} , 待优化参数范围也是 $[0, 300]$ 。通过试凑法反复确定的 PID 控制器参数为 $K_p = 20$, $K_i = 10$, $K_d = 3$ 。

根据动力模型计算出目标回正力矩, 在 PSO 优化 PID 控制器参数时, 控制器的参数变化如图 5 所示。最终确定的控制器参数 $K_p = 116.4$, $K_i = 287.6$, $K_d = 30.5$, ITAE 值为 0.383 3。GA 优化后的控制器参数 $K_p = 146.9$, $K_i = 282.4$, $K_d = 19.7$, ITAE 值为 0.384 6。目标力矩跟踪效果如图 6 所示。

通过图 6 可以看出, 使用 PID 控制路感电机, 可以较好地对目标回正力矩进行跟随。在局部放大图中, 可以发现通过试凑法确定参数的 PID 控制跟随效果要比其他 2 种寻优算法确定参数的 PID 控制效果要差。使用 GA 优化的 PID 控制器与 PSO 优化的控制器, 虽然评价 ITAE 指标值几乎

一致, 但在局部放大图中, 可以看出仍然不如 PSO 优化后的控制效果好, 并且在仿真过程中, GA 优化 PID 控制器的过程耗时较长。

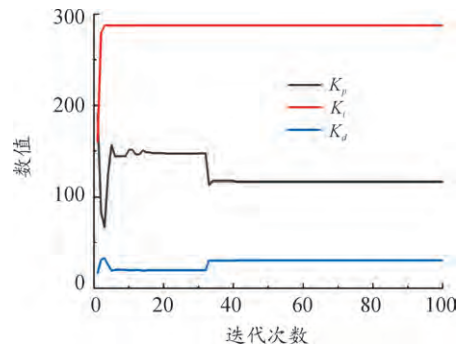


图 5 PSO 优化 PID 控制器参数变化曲线

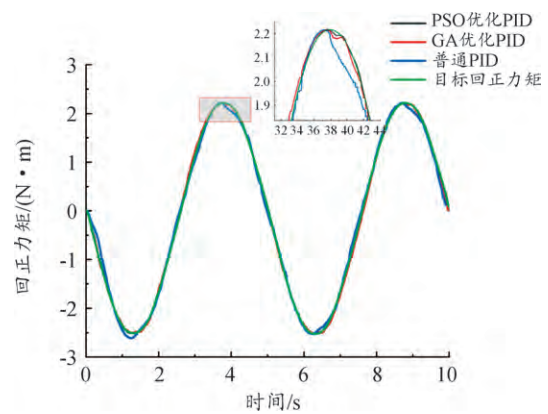


图 6 目标力矩跟踪效果

基于 PSO 优化控制器进行方向盘中间位置操纵稳定性试验。仿真得到的方向盘转矩与侧向加速度的关系如图 7 所示。

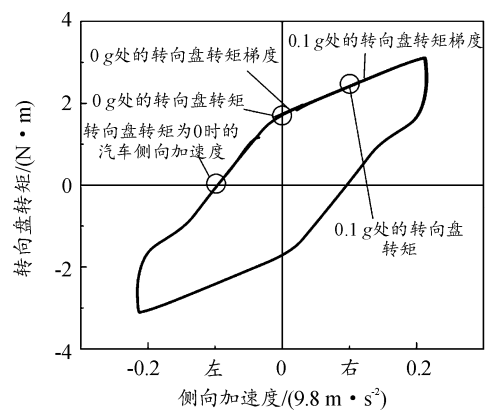


图 7 汽车侧向加速度与转向盘转矩关系

图 7 中标注^[18]有以下几点:

1) 转矩为 0 时的侧向加速度,表征了汽车的回正性能,仿真得到的该点侧向加速度为 $-0.096 g$ 。

2) $0 g$ 处的转向盘转矩,表征了转向系统中的库伦干摩擦,仿真得到的该点转向盘转矩为 $1.69 N \cdot m$ 。

3) $0 g$ 处的转向盘转矩梯度,是 $0 g$ 处转向盘转矩随汽车侧向加速度的变化率,表征了“路感”,仿真得到该点的值为 $15.5 N \cdot m / (9.8 m \cdot s^{-2})$ 。

4) $0.1 g$ 处的转向盘转矩,代表方向盘力的大小,仿真得到该点的转向盘转矩为 $2.42 N \cdot m$ 。

5) $0.1 g$ 处的转向盘转矩梯度,表示刚离开直线行驶状况的“路感”,仿真得到该点值为 $6.9 N \cdot m / (9.8 m \cdot s^{-2})$ 。

仿真结果与传统转向系统车辆的中间位置操纵实验结果^[18]见表 2 所示。

表 2 车辆评价指标对比

评价指标	传统转向	线控转向
转向盘转矩为 0 时的侧向加速度/ g	-0.110	-0.096
$0 g$ 处的转向盘转矩/ $(N \cdot m)$	1.57	1.69
$0 g$ 处的转向盘转矩梯度/ $(N \cdot m / (9.8 m \cdot s^{-2}))$	16.5	15.5
$0.1 g$ 处的转向盘转矩/ $(N \cdot m)$	2.43	2.42
$0.1 g$ 处的转向盘转矩梯度/ $(N \cdot m / (9.8 m \cdot s^{-2}))$	7.9	6.9

通过表 2 数值对比分析,可以得出,线控转向系统得到的“路感”与传统转向系统评价数值是接近的,即可以说明两者的“路感”体验是类似的。

3.2 实车试验

以配有传统转向系统的纯电动汽车为对象,验证线控转向系统的路感反馈控制策略。利用 RMS 方向盘转矩转角传感器、VBOX3i、轮速传感器及 HIOKII 存储记录仪等设备构建整车测试系统。其中 VBOX3i 用来测定车辆的行驶车速;转矩转角传感器的转角测量范围是 $-1\ 000^{\circ} \sim 1\ 000^{\circ}$,转矩测量范围是 $-100 \sim 100 N \cdot m$ 。试验设备如图 8 所示。

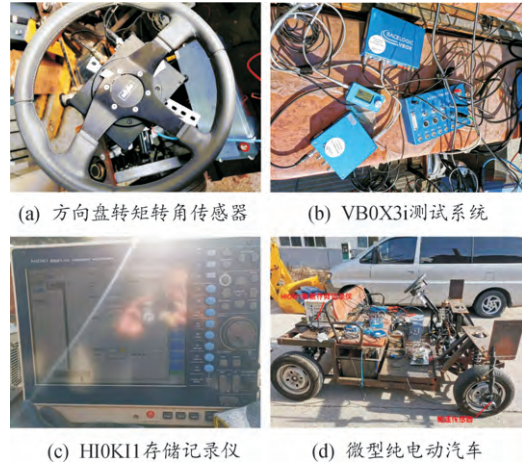


图 8 试验仪器设备实物图

进行原地转向实验,转向盘转矩与转角的关系如图 9 所示。可以看出,线控转向系统与传统转向系统相比,在达到最大转向盘转角时,驾驶员所提供的转向力矩大小是接近的,即转向过程中所遇到的转向阻力矩大小是接近的,可以说明所提出的路感控制策略可以提供驾驶员原车转向系统相类似的路感体验。

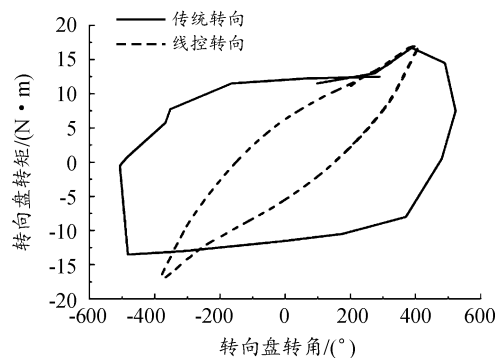


图 9 汽车原地转向转矩与转角关系

试验车辆低速行驶状态下,VBOX3i 测得车辆行驶车速如图 10 所示。

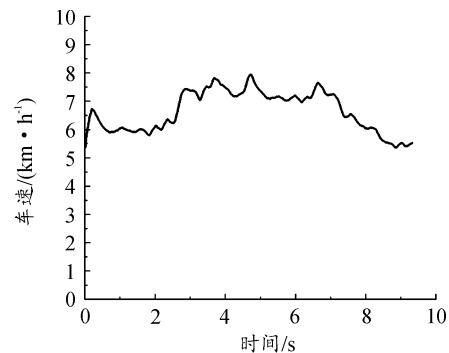


图 10 车辆低速行驶时车速

在执行转向操作时,利用 RMS 方向盘传感器测得原车转向系统的转向盘转矩转角对应关系与线控转向系统的对应关系如图 11 所示。

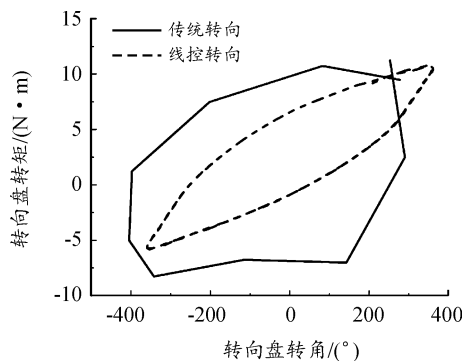


图 11 汽车低速行驶时转矩转角关系

根据图 11 可以看出: 车辆在低速行驶状态下执行转向操作时,线控转向系统与传统转向系统相比,在达到最大转向盘转角时,驾驶员所提供的转向力矩大小是接近的,即转向过程中所遇到的转向阻力矩大小是接近的,可以说明所提出的路感控制策略可以提供驾驶员原车转向系统相类似的路感体验。

4 结论

使用路感电机模拟转向阻力矩,搭建了线控转向汽车模型。通过中间位置操纵试验,证明了粒子群算法优化 PID 控制器精度更高,跟随效果更好,优于遗传算法优化 PID 控制器。在实车进行原地转向和低速转向试验时,所遇到的转向阻力矩大小与传统转向系统数值相近,验证了线控转向系统路感反馈控制策略的有效性。驾驶员执行转向操作,可以获得与传统转向汽车相似的“路感”体验。

参考文献:

[1] 李亮,王翔宇,程硕,等. 汽车底盘线控与动力学域控制技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(2): 143-160.

[2] KRISHNA S, NARAYANAN S, DENIS A S. Fuzzy logical based yaw stability control for active front steering of a vehicle[J]. Journal of Mechanical Science and Technolo-

gy, 2014, 28(12): 5169-5174.

- [3] 谷霄月,赵万忠,王春燕,等. 基于滤波估计的线控转向路感规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(3): 372-376.
- [4] 邓邦夏. 线控转向系统路感模拟方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [5] KIM S H, CHU C N. A new manual steering torque estimation model for steer-by-wire systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(7): 993-1008.
- [6] TAO W N, GAO B Z, CHU H Q, et al. Studies on steering feeling feedback system based on nonlinear vehicle model[J]. SAE Technical Paper Series, 2017.
- [7] ZHANG H, WANG Y, ZHANG G, et al. Research on LADRC strategy of PMSM for road-sensing simulation based on differential evolution algorithm[J]. Journal of Power Electronics, 2020, 20(4): 958-970.
- [8] LEE J, CHANG S, KIM K, et al. Steering wheel torque control of steer-by-wire system for steering feel[J]. SAE Technical Paper Series, 2017.
- [9] XIAO Z X, XIAO B X. Research on road feeling control strategy for electric forklift steer-by-wire system[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 11th conference on Industrial Electronics and Applications. China: IEEE, 2016: 1744-1749.
- [10] 谢有浩,赵林峰,陈无畏,等. 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[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 148-158.
- [11] ZHOU J, LU Z X. Research of double closed loop pid control strategy of road feeling motor[C]//Proceedings of the 2016 Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering, 2016, 59: 199-206.
- [12] TIAN J, WU J, CHEN N, et al. Research on road feeling control of steer-by-wire system[C]//2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Inner Mongolia, China. IEEE, 2011, 4349-4353.
- [13] 胡延平,朱天阳,蒋鹏飞,等. 线控转向系统路感摩擦补偿研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(5): 584-589, 595.
- [14] 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.
- [15] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 3 版. 北

- 京:清华大学出版社 2015.
- [16] 巩稼民,张晨,郝倩文,等.基于粒子群优化的二阶拉曼光纤放大器研究[J].光电工程,2020,47(11):71-78.
- [17] 曾振平,陈增强,袁著祉.基于新的误差积分准则的PID控制器优化[J].控制工程,2004,11(1):52-54.
- [18] 余志生.汽车理论[M].5版.北京:机械工业出版社 2009.

Research on road feel control strategy of automobile with steering by wire

XIE Ligang^{1 2}, CHEN Yong^{1 2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering ,
Beijing Information Science & Technology University , Beijing 100192 , China;
2. Beijing Laboratory for New Energy Vehicle , Beijing 100192 , China)

Abstract: The steer-by-wire (SBW) system cancels the mechanical connection between the steering wheel and the steering actuator, and the road feel needs to be simulated. Based on the Simulink and Carsim platforms, SBW vehicle model is established. According to the principle of the steering resistance torque generated during the steering process of the traditional steering system, the target steering resistance torque is calculated by the dynamic method. PID algorithm is used to control the road feel motor and simulate steering resistance torque. According to the ISO13674 standard, on-centre handling test is carried out. The simulation results show that the particle swarm optimization PID can more effectively realize road feel feedback. Finally, compared with the actual vehicle test of the traditional steering vehicle, the particle swarm optimization PID proves the effectiveness of the road feel control strategy of the steer-by-wire system.

Key words: steering-by-wire; particle swarm optimization; road feel motor

(责任编辑 卢燕)