

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.009

基于滤波估计的线控转向路感规划

谷霄月¹ 赵万忠^{1,2} 王春燕¹ 周 栋¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海, 200240)

摘要:线控转向系统取消了转向盘与转向轮之间的机械连接, 路面状况无法通过转向盘传递给驾驶员, 路感需要模拟产生。为此对驾驶员理想转向盘力矩影响因素进行分析, 基于汽车动力学模型, 采用卡尔曼滤波方法对回正力矩进行估计, 计算转向阻力矩, 研究转向路感与车速、变传动比及侧向加速度的一般规律, 提出基于滤波估计路感规划策略。仿真结果表明: 路感模拟方法可以使得驾驶员获得良好的路面信息, 提高汽车的操纵性和舒适性。

关键词:线控转向; 路感; 卡尔曼滤波; 变传动比; 侧向加速度

中图分类号:U461.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)03-0372-05

Road Feel Design for Steer-by-Wire Based on Filter Estimation

Gu Xiaoyue¹, Zhao Wanzhong^{1,2}, Wang Chunyan¹, Zhou Dong¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: Automobile steer-by-wire (SBW) system disconnects the mechanical link between the steering wheel and steerable wheels. It can't transmit the road condition to the driver through steering wheel. So the road feel should be produced by simulation. The ideal steering wheel effort characteristics of driver are analyzed. The steering resistance moment is computed by the dynamic model of steering system. The self-aligning torque is estimated by Kalman filter. According to the relationships between the road feel and velocity, the variable transmission ratio and the lateral acceleration, a strategy of road feel based on filter estimation is proposed. The simulation results show that the strategy can get good sense of the road condition and enhance riding smoothness and handing stability of vehicles.

Key words: steer-by-wire; road feel; Kalman filter; variable transmission ratio; lateral acceleration

线控转向(Steer-by-wire, SBW)代表未来动力转向技术的发展方向。该系统取消了转向盘和转向轮之间的机械连接, 完全摆脱了传统转向系统的各种限制, 理论上可以自由设计汽车转向系统的角传递特性和力传递特性, 为汽车转向特性的设计带来了广阔的空间, 使汽车的操纵性、舒适性和安全性得到较大的提高^[1-4]。在 SBW 转向系统中, 驾驶员的转向操作仅仅是向车辆输入转向盘的转角

命令, 由控制器和转向电机完成转向任务。驾驶员所需的路感需要路感电机模拟产生, 由控制器接受由传感器传送的车辆行驶状态信息, 模拟路感信息, 得到当前状态下的驾驶员理想转向盘力矩^[5]。

目前, SBW 路感规划主要有两种方法: 转向系统动力学建模方法^[6-7], 即根据车辆中可以测得的相关物理量建立动力学模型并得到路感反馈力矩, 但由于转向系统非常复杂, 系统摩擦对方向盘力反

基金项目:国家自然科学基金(51375007)资助项目; 江苏省研究生培养创新工程(SJLX-0144)资助项目; 研究生创新基地开放基金(kfjj201463)资助项目; 机械系统与振动国家重点实验室课题(MSV201507)资助项目。

收稿日期:2015-02-28; **修订日期:**2015-04-12

通信作者:赵万忠, 男, 副教授, E-mail: zhaowanzhong@126.com。

馈的影响难以确定,轮胎力与轮胎拖距很难准确获得,缺少车辆动态参数,影响路感的准确性;参数拟合合法^[8-9],即根据驾驶员主观评价来确定基于车辆状态变量的路感函数中的参数,如转向盘转角、车速等信息,通过加权拟合等方法得到该行驶状态下的驾驶员理想转向盘力矩,这种方法很容易实现汽车低速转向的轻便和高速转向的稳定,但没有对路感的主要来源转向阻力矩的考虑,缺少路面信息反馈,与真实路感存在差距。

本文将动力学建模和参数拟合应用到路感的规划中,综合考虑车速、变传动比及侧向加速度对路感的影响,提出基于卡尔曼滤波估计的路感规划方法。这种方式得到的路感比较全面,既可以反馈路面行驶信息,也可以达到低速转向轻便与高速转向稳定的效果。

1 动力学模型

1.1 转向盘及转向管柱模型

对转向盘,转向管柱进行动力学分析,运动微分方程为

$$T_h = J_{sw} \ddot{\delta}_{sw} + B_{sc} (\dot{\delta}_{sw} - \dot{\delta}_m) + K_s \cdot \Delta\delta_m + T_{f,c} \quad (1)$$

$$\Delta\delta_m = N_m \delta_m - \delta_{sw} \quad (2)$$

式中: T_h 为驾驶员施加给转向盘的力矩; δ_{sw} 为转向盘转角; J_{sw} 为转向盘、转向管柱转动惯量; B_{sc} 为转向盘阻尼系数; K_s 为转向轴刚度; δ_m 为路感电机输出转角; N_m 为路感电机减速比; $T_{f,c}$ 为系统摩擦力矩。

1.2 路感电机模型

路感电机运动微分方程为

$$T_m = J_m \ddot{\delta}_m + B_m \dot{\delta}_m + N_m K_s \cdot \Delta\delta_m \quad (3)$$

式中: T_m 为路感电机转矩; J_m 为电机转动惯量; B_m 为电机轴阻尼系数。

1.3 转向电机模型

转向电机模型为

$$T_{fm} = (i_g k_l i - f_m) \eta i_k - f_w \quad (4)$$

式中: T_{fm} 为执行电机转矩; i 为控制电流; i_g 为减速比; k_l 为电机常数; η 为电机传动效率; f_m 为转向电机摩擦因数; f_w 为转向系统摩擦因数; i_k 为转向系传动比。

2 SBW 系统的路感设计

传统转向系统的路感是在原有的转向阻力矩基础上叠加电子助力或液压助力特性形成的。本文研究对象是线控转向系统,转向盘力矩由路感电

机模拟生成,其路感规划由卡尔曼滤波估计得到的转向阻力矩值叠加补偿转矩构成。

2.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)方法主要包括两部分:时间更新和状态更新(见图1)。时间更新就是将当前状态变量作为先验估计实时向前投射到测量更新方程,测量更新方程实时校正先验估计以获得状态的后验估计值。图1中: k 为时间步长; \hat{X}_k^- 为利用上一个状态预测的结果; P_k^- 为 k 时刻 \hat{X}_k^- 对应的协方差矩阵; Z_k 为测量向量; A_k 、 B_k 、 H_k 为状态矩阵; u_k 为控制变量; Q_k 和 R_k 分别为过程噪声协方差和测量噪声协方差矩阵。

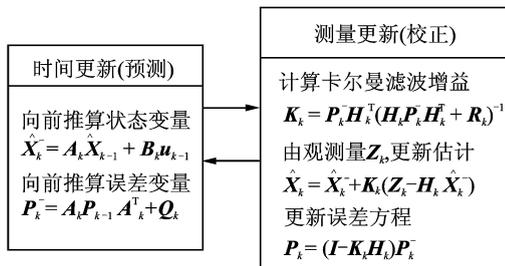


图1 卡尔曼算法工作原理

Fig. 1 Working principle of Kalman filter

2.2 转向阻力矩计算

在SBW系统中,转向阻力矩除了轮胎的回正力矩外,还有转向系统的惯性和阻尼对转向阻力矩的影响。因此,转向阻力矩表示为

$$M = J_s \ddot{\delta}_{sw} + B_s \dot{\delta}_{sw} + \frac{T_z}{i_k} \quad (5)$$

式中: J_s 为转向系统转动惯量; B_s 为转向系统阻尼系数; T_z 为轮胎回正力矩。

对回正力矩进行估计。将模型改写成状态空间形式,建立系统的状态和测量方程

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx \quad (7)$$

方程(6,7)中的状态变量为

$$x = [\delta \quad \dot{\delta} \quad T_z]^T \quad (8)$$

$$u = [i] \quad (9)$$

$$y = [\delta] \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_s}{J_s} & \frac{1}{J_s} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{i_g k_l \eta i_k}{J_e} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (13)$$

式中 δ 为前轮转角。根据方程(6~13),利用卡尔

曼滤波算法进行估算,从中获取回正力矩值。

2.3 路感影响因素分析

2.3.1 车速对路感的影响

传统机械式转向系统,在低速行驶如在停车场驶入停车位时,转向会受到较大的摩擦阻力矩,转向盘力矩较为沉重;而当车速较快如在高速公路行驶时,则摩擦阻力矩会变小,转向盘力矩较小,影响转向的稳定性。因此,需要通过在不同车速下提供不同助力,使操纵感觉良好。本文采用直线型助力方法,如图2所示。

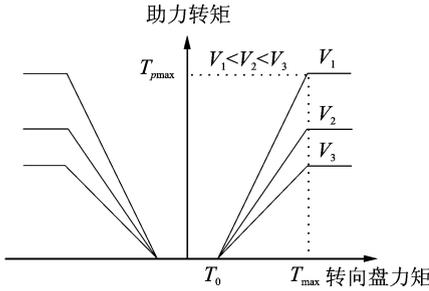


图2 助力特性曲线

Fig. 2 Assist characteristic curve

该助力特性用函数表示为

$$T_p = \begin{cases} 0 & T \leq T_0 \\ K_v \cdot (T - T_0) & T_0 < T < T_{max} \\ T_{pmax} & T \geq T_{max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: K_v 为助力系数; v 为车速。由式(14)分析说明在低速时提供大助力,转向轻便,随着车速升高,助力越来越小,高速时助力较小,转向稳定。

2.3.2 变传动比对路感的影响

SBW 车辆融入了变传动比的设计,改变了系统的角位移特性,低速时,采用小传动比策略,使得转向轻便;高速时,采用较大传动比,使转向稳定。但与此同时,这必将改变力位移特性,因此通过变传动比特性对路感进行补偿,以达到较舒适的路感特性。

综合考虑横摆角速度和侧向加速度因素,通过调节比例系数 k_{ux} 和 k_{ay} ,使不同车速下影响因素权重不同。于是得到理想传动比控制规律为

$$\begin{cases} i_k = 8 & u < 20 \text{ km/h} \\ i_k = k_{ux} \cdot i_{ux} + k_{ay} \cdot i_{ay} & u \geq 20 \text{ km/h} \end{cases} \quad (15)$$

其中

$$i_{ux} = \frac{v/L}{1 + \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right) v^2} \quad (16)$$

$$i_{ay} = \frac{v^2/L}{1 + \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right) v^2} \quad (17)$$

式中: a 、 b 分别为前、后轴至车辆质心的距离; L 为轴距; k_1 、 k_2 分别为前后车轮的侧偏刚度。

采用变传动比策略后,使转向特性得到改善,但会导致实际路感与理想路感产生偏差,所以需要根据不同的变传动比对路感进行修正补偿。

$$T_i = -k_i \cdot T \quad (18)$$

$$k_i = \frac{T_{ideal} - T}{T} \quad (19)$$

式中: T_{ideal} 为不同车速下对应的理想驾驶员手力; T 、 T_i 分别为补偿前后的转向盘力矩。根据不同变传动比对 k_i 进行拟合,得到一组连续的表达式,使加入变传动比策略后仍有较佳路感。

2.3.3 侧向加速度对路感的影响

在中高侧向加速度做曲线运动时,转向盘力矩主要体现的是由侧向加速度引起的回正力矩大小,因此有人认为转向盘力最好与侧向加速度有线性关系,如图3中 b 线所示;在高侧向加速度区有高的转向盘力矩如图3中 a 线,则将使驾驶员感到转向盘过于沉重;转向盘力达到最大值后,在高侧向加速度区下降,如图3中 d 线表示丧失路感,不利于驾驶;图3中 c 线表示高侧向加速度时,转向盘力矩不会过小而维持一定数值,以帮助驾驶员稳定驾驶。

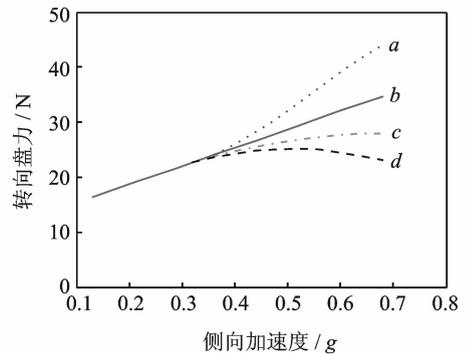


图3 转向盘力特性

Fig. 3 Steering wheel force characteristics

由图3可知,理想的转向盘力矩随侧向加速度变化趋势,可以用转向盘力矩梯度表示

$$\frac{dT}{da_y} = \frac{F_z (l_{tp} + l_{bp})}{g i_k K} \quad (20)$$

式中: F_z 为地面垂直作用力; a_y 为侧向加速度; l_{tp} 为轮胎拖距; l_{bp} 为气胎拖距。如果 $dT/da_y < 1.5$, 那么驾驶员所能感知的行驶信息太小,路感不良;

如果 $dT/da_y > 3$,那么驾驶员在移线或快速驶入车道时比较困难^[10]。因此,在 $a_y \geq 4g$ 的情况下应使转向盘力矩梯度接近 1.5。

根据式(21)求出在高侧向加速度时的最佳补偿系数。

$$K = \frac{F_z(l_{fp} + l_{hp})}{g^i_k \left(\frac{dT}{da_y} \right)} \quad (21)$$

3 转向路感仿真与分析

综合上述汽车系统动力学与回正力矩估计模型得到汽车转向阻力矩计算值,采用该模型对汽车各种工况进行转向盘力矩仿真试验。

根据速度对转向力矩进行助力转矩补偿后,得到转向盘力矩与车速的关系如图4所示。

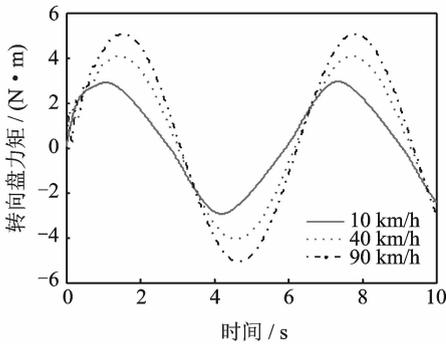


图4 不同车速下力特性曲线

Fig.4 Force under different vehicle speeds

由图4可知,在低速情况下,最大转矩大概为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$,可以满足低速转向轻便性要求,随着速度的增加,转向助力逐渐减小,转向盘转矩逐渐增加,高速时,转向盘力矩为 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右,以满足转向稳定性要求。

加入变传动比补偿后路感会产生相应变化,对在低速情况下进行了双曲线仿真(速度 10 km/h),得到有无变传动比补偿下的转向盘力矩和转向盘转角分别如图5,6所示。

对高速双移线工况(车速为 90 km/h ,前轮转角最大不超过 5°)进行了仿真分析,得到有无变传动比补偿下的横摆角速度和转向盘力矩分别如图7,8所示。

由图5~8可知,加入变传动比补偿后,车辆低速情况下可以满足驾驶轻便性与灵活性的协调统一,在高速工况下实现路感清晰与行驶稳定的完美融合。

本文进行了侧向加速度补偿仿真试验:输入转

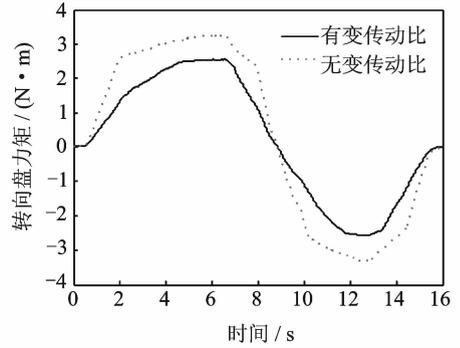


图5 转向盘力矩曲线(车速=10 km/h)

Fig.5 Steering wheel force curve(vehicle speed=10 km/h)

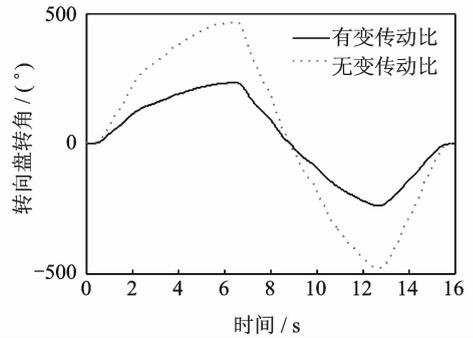


图6 转向盘转角曲线(车速=10 km/h)

Fig.6 Steering wheel curve(vehicle speed=10 km/h)

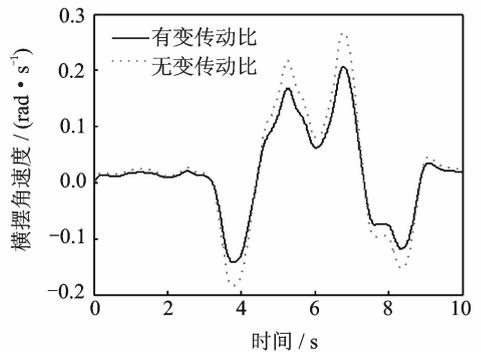


图7 横摆角速度曲线(车速=90 km/h)

Fig.7 Yaw rate curve(vehicle speed=90 km/h)

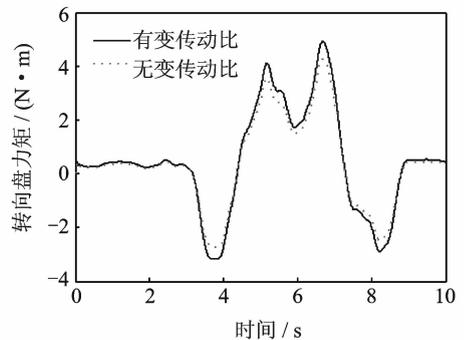


图8 转向盘力矩曲线(车速=90 km/h)

Fig.8 Steering wheel force curve(vehicle speed=90 km/h)

向盘转角值,使其从0逐渐增大至该速度下转向盘最大值,此时补偿后的转向盘力矩与侧向加速度关系如图9所示。

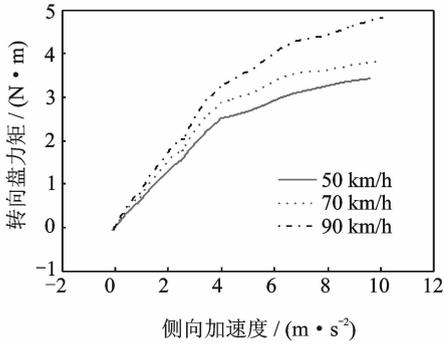


图9 转向盘力矩与侧向加速度关系曲线

Fig.9 Steering wheel force vs. lateral acceleration curve

由图9可以得出,通过加入补偿后,就同一车速下的的曲线而言,随着侧向加速度的增加路感逐渐增强,在侧向加速度较大区域,转向盘力矩增加缓慢,并有饱和现象出现;就不同车速而言,车速越大,两曲线之间差值越大,即转向力矩梯度越大,路感越明显。从而使汽车在中高速行驶时,可以使驾驶员对汽车行驶状态进行掌握,并且保证转向盘力矩不会超过驾驶员的承受范围。

4 结束语

本文基于SBW系统动力学模型,采用卡尔曼滤波对回正力矩进行估计,计算转向阻力矩,并考虑车速、变传动比及侧向加速度等影响因素,提出了基于卡尔曼滤波的路感规划方法,解决了SBW汽车无法将路面信息传递给转向盘的问题,并通过建立相关模型进行系统仿真验证,结果表明:在保证驾驶员能够感受汽车行驶状况的基础上,在低速转向工况下,该路感可满足驾驶员转向轻便性与灵活性的协调统一,高速工况下,使转向路感与稳定性达到完美融合。

参考文献:

[1] 陈慧鹏,陈立平,王君明. 电动助力转向系统性能优化及参数研究[J]. 机械科学与技术,2010,29(2):146-152.

Chen Huipeng, Chen Liping, Wang Junming. Optimization of the parameters and performance of an electric power steering system [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(2):146-152.

[2] Oh Se-Wook, Yun Seok-Chan. The development of an advanced control method for the steer-by-wire system to improve the vehicle maneuverability and stability[R]. SAE Paper 2003-01-0578, 2003.

[3] Manasini R, Morrel K, Kurt K, et al. Optimum design of a steer by wire system using systematic system engineering approach [R]. SAE Paper 2008-01-1452, 2008.

[4] Hayama R, Kawahara S, Nakano S, et al. Resistance torque control for Steer-by-wire system to improve human-machine interface [J]. Vehicle System Dynamic, 2010, 48(9):1065-1075.

[5] 魏建伟,魏民祥. 基于主动转向干预的EPS系统转向盘力矩突变修正策略[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(4):572-576.

Wei Jianwei, Wei Minxiang. Correction strategy of steering wheel torque for EPS system based on intervention of active steering [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(4):572-576.

[6] Morgando A, Velardocchia M. Steering feedback torque definition and generation in a steer by wire system[R]. SAE Paper 2008-01-0498, 2008.

[7] Guo Konghui, Guan Hsin, Zong Changfu. Development and applications of JUT-ADSL driving simulator[C]//IVEC'99. Changchun, China:[s. n.], 1999:1-6.

[8] Atsuhiko Yoneda, Akashi Miyoshi, Yasuo Shimizu. Cogging torque target and design of motor for EPS [R]. SAE Paper 2006-01-1320, 2006.

[9] 任夏楠,邓兆祥. 驾驶员理想转向盘力矩特性研究[J]. 中国机械工程, 2014(16):2261-2265.

Ren Xianan, Deng Zhaoxiang. Research on ideal steering wheel effort characteristics of driver[J]. China Mechanical Engineering, 2014(16):2261-2265.

[10] 陈龙,袁朝春,江浩斌,等. 电动助力转向系统助力特性研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(9):1119-1122.

Chen Long, Yuan Chaochun, Jiang Haobin, et al. Research on ideal steering wheel effort characteristics of driver[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(9):1119-1122.

