

汽车线控转向系统路感模拟方法^{*}

郑宏宇 宗长富 王 祥

(吉林大学汽车动态模拟国家重点试验室, 长春 130025)

【摘要】 线控转向系统取消了传统转向系统方向盘到转向车轮的机械连接,因而转向路感无法直接反馈给驾驶员,为此通过对汽车转向系统路感的理论分析,建立了线控转向系统动力学模型。采用卡尔曼滤波技术对汽车转向系统齿条受力进行估计,并引入电动助力转向系统的助力特性,设计复制电动助力转向系统路感的线控转向系统路感模拟方法。试验结果表明,路感模拟方法可以使驾驶员获得有效的路感信息,提高了汽车的操纵性和舒适性。

关键词: 车辆 线控转向 路感 模拟方法 卡尔曼滤波
中图分类号: U463.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0018-05

Road Feel Design for Vehicle Steer-by-wire System

Zheng Hongyu Zong Changfu Wang Xiang

(State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

For steer-by-wire (SBW) system removes mechanical linkages between steering system and front wheels, driver is unable to sense road information, a dynamic model of SBW system was established to analyze the road feel theory of vehicle steer system. The road feel control method of SBW system was designed to produce the steering road feel almost the same as that obtained in a conventional electric power steering (EPS) system. Road feel was computed by rack force of steer system and assist characteristics of EPS system. For rack force was difficult to measure, an algorithm was proposed to estimate rack force by Kalman filter. The test results showed that drivers could effective get road feel information and SBW system could improve the vehicle maneuverability by the proposed road feel control method.

Key words Vehicle, Steer-by-wire, Road feel, Simulated method, Kalman filter

引言

随着汽车电子和控制技术的不断发展,线控转向(steer by wire,简称SBW)已经成为未来电控转向系统的发展方向,它取消了传统转向系统中方向盘与转向车轮之间的机械连接,转向角传动比可以自由设计,使汽车的操纵性和舒适性得到较大提高^[1-3]。但是,这也导致了路感信息无法直接传递给驾驶员。路感是驾驶员转动方向盘时感受到的方向盘反作用力,这个力包含了整车及轮胎的运动、受

力状况,即良好的路感是驾驶汽车不可缺少的反馈信息^[4]。在SBW系统中,路感由方向盘模块中的路感模拟执行电动机输出力矩模拟生成。

目前,SBW系统的路感模拟方法主要有两种:动力学算法^[5-6],即通过分析传统机械转向系统的路感产生原理,根据与路感相关的动力学参数,主要包括轮胎纵向力和侧向力、轮胎拖距、前后轮侧偏刚度和整车相关参数等,建立动力学模型并计算得到路感反馈力矩,该方法设计的路感与目前传统转向汽车路感基本近似,可以使驾驶员相对容易适应,

收稿日期: 2010-03-09 修回日期: 2010-04-06
^{*} 国家自然科学基金资助项目(50775096)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA110102)
作者简介: 郑宏宇,讲师,主要从事汽车动态仿真及控制研究,E-mail: zheng.hongyu@yahoo.com.cn
通讯作者: 宗长富,教授,博士生导师,主要从事汽车动态仿真及控制研究,E-mail: cfzong@yahoo.com.cn

但是轮胎力及拖距的参数很难准确获得,影响了路感反馈的准确性;参数拟合法^[7~8],即在汽车各个状态和参数变量中,选取与路感信息相关的变量,如方向盘转角、车速和侧向加速度等,通过加权拟合的方法得到路感,该方法可以很容易地实现汽车低速转向轻便性和高速转向路感清晰,但是在汽车全工况下得到的路感与传统转向系统路感往往存在一定的差异,增加了驾驶员对 SBW 系统的适应负担。

本文选取某国产样车,将样车中原有的电动助力转向(electric power steering,简称 EPS)系统改装为 SBW 系统。其中,路感模拟采用第一种方法,针对轮胎力和轮胎拖距等参数较难获得的问题,选取汽车转向系统齿条受力信息作为路感模拟的重要变量,并通过卡尔曼滤波(Kalman filter,简称 KF)方法实现对齿条受力的准确估计,并将其折算成路感,最终为驾驶员提供路感反馈。

1 汽车转向路感产生原理分析

路感是驾驶员转动方向盘时需要克服的阻力矩,可以看作由回正力矩产生的阻力矩和由摩擦力矩产生的阻力矩组成。其中回正力矩由 3 部分组成:轮胎回正力矩,与其前轮与路面相互作用产生的轮胎力和拖距有关;前轮定位引起的回正力矩,与其轮胎力与前轮主销定位角有关;惯性力矩,主要包括前轮绕主销的惯性力矩和转向系统的惯性力矩。回正力矩可以反映整车及轮胎的运动、受力状况以及路面环境信息,被认为是有效的路感信息。摩擦力矩主要是部件与部件之间相对摩擦产生的阻力矩,通常被认为是阻碍驾驶员获得良好路感信息的“噪声”,摩擦力矩越小驾驶员所获得的路感越能真实反映车辆和环境信息。然而,当汽车行驶在颠簸路面时,驾驶员往往会感觉到路面产生的冲击力矩,严重干扰驾驶员的正常驾驶,而此时摩擦力矩可以起到阻尼的作用。因此在传统转向系统的设计过程中,通常也保留一定的摩擦力矩,采用折中的方法设计路感。

SBW 系统由于没有机械连接,因此不需要考虑路面冲击对驾驶员的影响,可以将回正力矩信息反馈给驾驶员的同时,减小摩擦力矩对路感的不良影响。

2 SBW 系统动力学建模

根据设计路感模拟控制方法的需要,建立 SBW 系统动力学模型,主要包括方向盘模块和前轮转向模块两部分。

2.1 方向盘模块

方向盘模块由方向盘和路感模拟电动机两部分组成,其方程为

$$J_c \ddot{\delta}_{sw} + B_c \dot{\delta}_{sw} + M_c = T_{sw} - G_m T_m \quad (1)$$

式中 J_c ——方向盘转动惯量

B_c ——方向盘粘性阻尼系数

M_c ——方向盘模块干摩擦力矩

δ_{sw} ——方向盘转角 T_{sw} ——驾驶员转矩

G_m ——减速比 T_m ——路感电动机力矩

2.2 前轮转向模块

前轮转向模块主要由转向系统和转向电动机两部分组成,由于本文采用估计转向器齿条力的方法设计路感,因此仅需要建立齿轮齿条转向器模型,即

$$M_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r = G_f \frac{T_f}{r_p} - F_r \quad (2)$$

式中 M_r ——齿条质量 x_r ——齿条位移

B_r ——转向器齿条粘性阻尼系数

G_f ——减速比 T_f ——转向电动机力矩

r_p ——小齿轮半径 F_r ——齿条力

根据传统转向汽车结构可知,由前轮产生的回正力矩和转向系统的摩擦力矩反馈给驾驶员之前需要由齿轮齿条转向器传递,因此齿条力包括回正力矩和摩擦力矩信息。将齿条力看作两部分组成,即

$$F_r = F_{AT} + F_f \quad (3)$$

式中 F_{AT} ——回正力矩作用在齿条上的力

F_f ——摩擦力矩作用在齿条上的力

F_f 主要与前轮转角和干摩擦系数有关,可以表示为

$$F_f = \frac{\tau_{fw} (\dot{\delta}_{fw})}{r_p} \quad (4)$$

式中 τ_{fw} ——转向系统摩擦力矩,取 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$

$\dot{\delta}_{fw}$ ——前轮转角

同理,方向盘模块摩擦力矩可以表示为

$$F_c = \tau_{sw} (\dot{\delta}_{sw}) \quad (5)$$

式中 τ_{sw} ——方向盘摩擦力矩,取 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$

τ_{fw} 和 τ_{sw} 在机械转向系统中近似为常数,而在 SBW 系统路感模拟中可以自由设计。考虑到驾驶员通常希望汽车低速转向轻便,高速转向路感清晰,因此将 τ_{fw} 和 τ_{sw} 改写为 τ'_{fw} 和 τ'_{sw} ,即设计为随车速变化的参数,以满足不同车速下驾驶员对路感的要求,具体为

$$\tau'_{fw} = \begin{cases} \tau_{fw} \frac{v}{80} & (v \leq 80 \text{ km/h}) \\ \tau_{fw} & (v > 80 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (6)$$

4.1 中心区转向试验

中心区转向试验工况主要考察汽车高速行驶时的操纵性能和路感反馈情况,具体试验方法参考 ISO 13674-1。试验车速为 100 km/h,侧向加速度峰值约为 2 m/s^2 ,方向盘转角输入值近似于周期为 5 s 的正弦曲线。

图 3 为中心区转向试验的齿条力估计值和实际值的对比结果,从图中可以看出二者变化趋势和峰值响应时间基本相同,吻合度较好,即基于 KF 方法的齿条力估计值与实际值比较接近,精度较好。

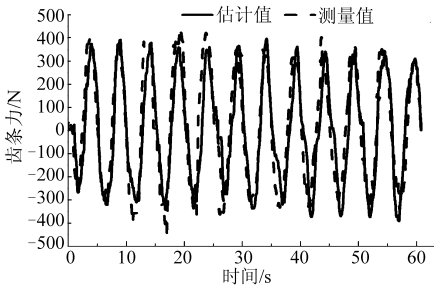


图 3 中心区转向齿条力试验结果

Fig. 3 Test results of on-centre handling

图 4 为中心区转向路感的硬件在环试验和实车试验的对比结果。为了保证汽车高速转向的平稳性,SBW 系统保留了摩擦力矩,因此试验台试验和样车试验结果比较接近,即所设计的路感模拟方法能很好的复制原车 EPS 系统的路感,具体如表 1 所示。

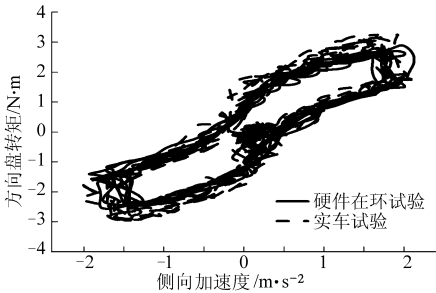


图 4 中心区转向路感试验结果

Fig. 4 Test results of on-centre handling

表 1 中心区转向路感试验结果

Tab. 1 Road feel test results of on-centre handling			
指标	EPS	SBW	
方向盘转矩为 0 的侧向加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.47	0.45	
侧向加速度为 0 的方向盘转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	1.106	1.094	
侧向加速度为 0 的方向盘转矩梯度/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	21.21	21.41	
侧向加速度为 1 m/s^2 时的方向盘转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	2.487	2.461	
侧向加速度 1 m/s^2 的方向盘转矩梯度/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	11.56	11.38	

从表 1 的中心区转向试验工况评价指标可以看出,SBW 系统的各项指标值与 EPS 系统指标值基本

相同,说明 SBW 系统为驾驶员提供的路感反馈信息基本复制了 EPS 系统的路感,可以保证汽车高速行驶时的转向平稳性。

4.2 转向轻便性试验

转向轻便性试验工况主要考察汽车低速行驶时的操纵性能和转向轻便性,具体试验方法参考国家标准 GB/T 6323.4—1994。试验车速为 10 km/h 左右,按照预先设定的路线行驶。试验结果如图 5 和图 6 所示。

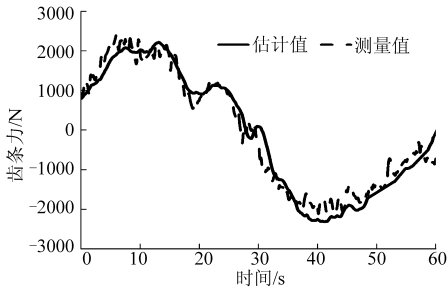


图 5 转向轻便性齿条力试验结果

Fig. 5 Rack force test results of steering efforts

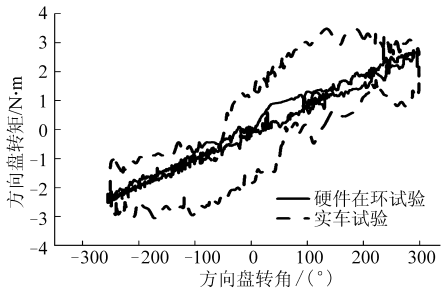


图 6 转向轻便性路感试验结果

Fig. 6 Road feel test results of steering efforts

图 5 为转向轻便性试验的齿条力估计值和实际值的对比结果,可以看出二者的变化趋势和峰值时间基本相同,吻合度较好,验证了算法的有效性。

图 6 中实线为硬件在环试验结果,虚线为实车试验结果,具体如表 2 所示。

表 2 转向轻便性试验结果

Tab. 2 Test results of steering effort			
指标	EPS	SBW	
方向盘最大作用力矩均值/ $\text{N}\cdot\text{m}$	3.21	2.57	
方向盘最大作用力均值/ N	17.35	13.89	
方向盘平均作用力/ N	5.12	3.83	
方向盘平均作用力矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	0.94	0.71	
侧向加速度 1 m/s^2 时方向盘转矩梯度/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$	11.56	11.38	

从图 6 和表 2 可知,汽车在低速行驶时,SBW 系统路感反馈可以完全不受摩擦力矩的影响,方向盘转角对应方向盘转矩的曲线滞环较小,提高了汽车低速转向轻便性,减轻了驾驶负担。

5 结束语

SBW 系统由于取消了方向盘到转向车轮直接的机械连接,导致路感无法直接反馈给驾驶员而需要模拟生成。本文从复制传统 EPS 系统路感反馈信息的角度出发,采用 KF 方法估计机械转向系统齿条力并结合 EPS 系统的助力转向特性,设计了

SBW 系统路感模拟方法。通过硬件在环试验结果表明,该方法可以保证汽车高速转向的平稳性,与 EPS 系统路感反馈效果基本一致。同时利用 SBW 系统不受摩擦力矩的影响,使 SBW 系统路感的低速转向轻便性好于 EPS 系统,在保证汽车操纵性的同时,提高了驾驶舒适性。

参 考 文 献

1 Sanket Amberkar, Farhad Bolouchi, Jon Demerly, et al. A control system methodology for steer by systems[C]. SAE Paper 2004-01-1106, 2004.

2 Manasina Rath, Morrel Kelly, Kurt Kober, et al. Optimum design of a steer by wire system using systematic system engineering approach[C]. SAE Paper 2008-01-1452, 2008.

3 于蕾艳,林逸,施国标. 线控转向系统的主动转向控制策略[J]. 农业机械学报,2008, 39(1): 4~6.
Yu Leiyang, Lin Yi, Shi Guobiao. Active steering control strategy of steer-by-wire system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 4~6. (in Chinese)

4 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2009.

5 Andrea Morgando, Mauro Velardocchia. Steering feedback torque definition and generation in a steer by wire system[C]. SAE Paper 2008-01-0498, 2008.

6 罗石,商高高,苏清祖. 线控转向系统转向盘力回馈控制模型的研究[J]. 汽车工程,2006,28(10):914~917.
Luo Shi, Shang Gaogao, Su Qingzu. A research on steering wheel force feedback control model for steer by wire system[J]. Automobile Engineering, 2006, 28(10): 914~917. (in Chinese)

7 Se-Wook Oh, Ho-Chol Chen, Seok-Chan Yun, et al. The design of a controller for the steer-by-wire system[J]. JSME International Series C, 2004, 47(3): 896~907.

8 Yang Shengbing, Den Chunan, Ji Xuewu, et al. Research on road feeling control strategy of steer-by-wire[C]. SAE Paper 2007-01-3652, 2007.

9 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2006.

(上接第 27 页)

9 Wan E A, Nelson A T. Kalman filtering and neural networks[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.

10 Crisan D, Doucet A. A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(3): 736~746.

11 Pierre D M, Arnaud D, Ajay J. Sequential Monte Carlo samplers[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 2006, 68(3):411~436.