

汽车电动助力转向系统转向盘转矩直接控制策略

申荣卫^{1,2}, 林逸¹, 台晓虹², 施国标¹

(1. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2. 邢台职业技术学院汽车系, 河北邢台 054035)

摘要:为改善汽车转向轻便性和路感的问题,设计了以转向盘转矩为控制目标的电动助力转向系统。在分析电动助力转向系统数学模型的基础上,建立了基于 Simulink 的电动助力转向系统仿真模型。仿真结果表明,所设计的电动助力转向系统,在改善转向轻便性和路感问题的同时,控制性能不受系统参数变化的影响,具有稳定的转向盘转矩特性。

关键词:车辆工程;电动助力转向;建模;转向盘转矩控制

中图分类号:U463.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)03-0504-05

Steering torque direct control strategy for vehicle electric power steering system

Shen Rong-wei^{1,2}, Lin Yi¹, Tai Xiao-hong², Shi Guo-biao¹

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Automotive Department, Xingtai Vocational and Technical College, Xingtai 054035, China)

Abstract: To improve the steering easiness and road feel of the vehicle, an electric power steering (EPS) system with the steering torque as the control target was developed. A Simulink based simulation model was built for the vehicle EPS system on the basis of the analysis of the mathematics model of the EPS system. The simulation results show that the developed EPS system improves the steering easiness and road feel, at the same time, the control performance of the system does not change with the parameters of the system and has stable steering torque characteristic.

Key words: vehicle engineering; electric power steering; modeling; steering wheel torque control

电动助力转向系统(EPS)是一种新型的动力转向系统,由于其具有节能、环保和软件修改助力特性等优点而得到越来越多的汽车制造商的青睐^[1,2]。电动助力转向系统的首要任务是解决低速转向轻便性问题,同时高速时还要考虑转向不要太轻,以给驾驶员一定的路感。传统的电动助力转向系统一般通过控制助力电机的电流来控制助力转矩的大小,从而间接实现驾驶员在不同转向工况下对转向盘转矩特性(转向盘转矩与转向盘转角之间的关系)的要求,转向系统参数发生改变(如由于润滑情况的改变引起的阻尼和摩擦变

化),转向盘的转矩特性就会发生变化。针对这种情况,作者提出了一种以转向盘转矩为目标转矩的控制策略,并构建了基于 Simulink 的仿真模型,通过计算机仿真验证了所提出的控制策略的合理性。

1 电动助力转向系统工作原理和转向盘转矩特性

1.1 电动助力转向系统工作原理

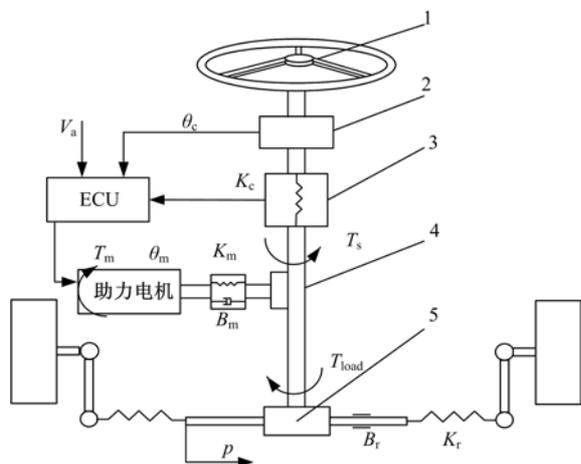
作者设计了一种以转向盘转矩为控制目标的电动助力转向系统,如图 1 所示。系统由转向盘

收稿日期:2006-03-15.

基金项目:北京市科委奥运项目(D0305002040111).

作者简介:申荣卫(1971-),男,副教授,博士.研究方向:汽车电子技术. E-mail:rongweishen@sohu.com

转角传感器、转向盘转矩传感器、车速传感器、助力电机及减速机构、控制器及齿轮齿条机械转向系统等组成。与传统电动助力转向系统相比,取消了电机电流传感器。



1-转向盘;2-转角传感器;3-转矩传感器;4-减速机构;5-齿轮齿条转向器

图 1 电动助力转向系统结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of EPS

该系统采用的控制策略如图 2 所示。控制策略分上下两层,上层控制策略根据转向盘转角信号和车速信号从事先制定好的转向盘转矩特性图中查取相应的目标转向盘转矩。下层控制策略对目标转向盘转矩与实际转向盘转矩的偏差进行 PID 和 PWM 闭环控制,从而实现转向盘目标转矩的直接控制。

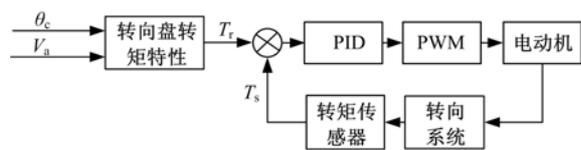


图 2 控制策略

Fig. 2 Control strategy

1.2 转向盘转矩特性制定方法

由图 2 可知,制定合适的转向盘转矩特性是控制的关键。转向盘转矩特性根据转向盘转角、车速信号、驾驶员的具体要求进行合理的设计。设计转向盘转矩特性时,既要考虑转向轻便性的要求,也要考虑驾驶员对路感的要求^[3]。

转向盘转矩 T_r 和转向盘转角 θ_c 、车速 V_a 之间的关系(如图 3 所示)为

$$T_r = K(V_a)\theta_c, \theta_2 < \theta_c < \theta_1 \quad (1)$$

$$T_r = C\theta_c, \theta_c \leq \theta_2 \text{ 或 } \theta_c \geq \theta_1 \quad (2)$$

式中: $K(V_a)$ 为车速系数; C 为饱和转矩; θ_1 、 θ_2 分

别为饱和转矩对应的临界转向盘转角。

车速一定时,由于转向系统的转向阻力矩随转向盘转角的增加而增加,因此,目标转向盘转矩也应随着转向盘转角的增大而增大^[4]。为使转向盘转到大角度时转向更加轻便,可以根据需要设置转向盘转矩饱和区。解决转向轻便性的问题后,还要根据车速信号调节助力大小,以获得合适的路感。基本要求是:车速升高时,目标转向盘转矩适当增加。

根据上述要求,为某车型设计的转向盘转矩特性如图 4 所示。

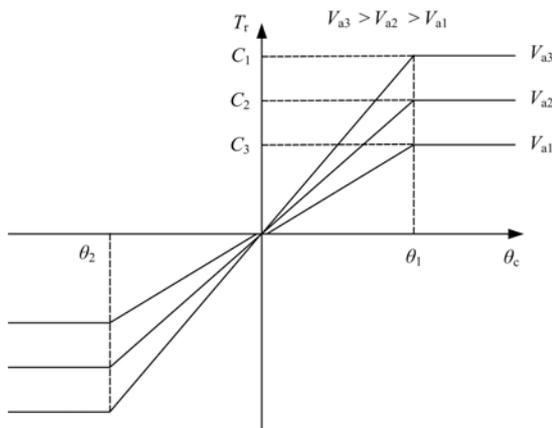


图 3 转向盘转矩特性图

Fig. 3 Steering torque characteristic map

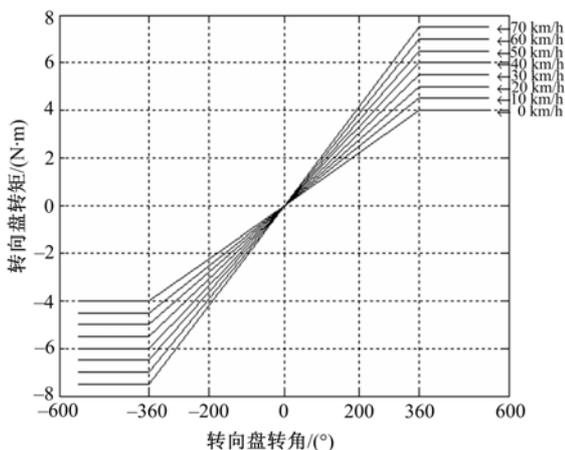


图 4 转向盘转矩特性图

Fig. 4 Steering torque characteristic map

2 电动助力转向系统建模

作者构建的基于 Simulink 的电动助力转向系统仿真模型如图 5 所示。

2.1 转向系和电机模型

机械转向系统由很多具有弹性和阻尼特性的

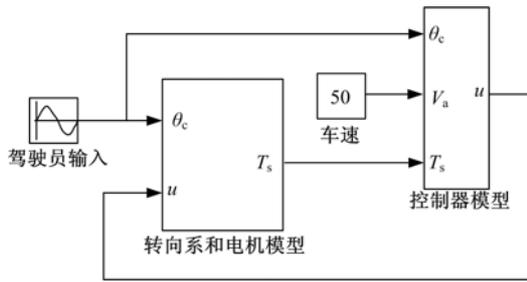


图 5 基于 Simulink 的电动助力转向系统仿真模型

Fig. 5 EPS simulation model based on Simulink

质量元件和惯量元件组成。在进行系统建模时,完全考虑所有元件的特性会使系统模型非常复杂,同时也是不必要的。考虑到系统的基本特性是由低频元件决定的,仿真的目的主要是对助力特性和控制策略进行验证,建模时将机械转向系统进行了适当的简化^[5-7]。如图 1 所示,考虑转向系各组成部分的转动惯量、刚度、黏性阻尼、库仑摩擦,并将两侧车轮到齿条端的部件简化成一线性弹簧,两侧弹簧的总刚度为 K_r ,并认为弹簧另一端固定不动,两侧车轮和齿条等效为一当量质量。

转矩传感器检测值为

$$T_s = K_c(\theta_c - \frac{p}{r_p}) \quad (3)$$

电机动力学方程为

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{im} \operatorname{sgn} \dot{\theta}_m + K_m(\theta_m - \frac{p}{r_p} i_m) = T_m \quad (4)$$

齿条动力学方程为

$$M_r \ddot{p} + B_r \dot{p} + F_f \operatorname{sgn} \dot{p} + K_r p = \frac{K_c}{r_p}(\theta_c - \frac{p}{r_p}) + \frac{K_m i_m}{r_p}(\theta_m - \frac{p}{r_p} i_m) \quad (5)$$

助力电机电气方程为

$$L \dot{i} + Ri + K_f \dot{\theta}_m = u \quad (6)$$

$$T_m = K_t i \quad (7)$$

式(3)~(7)中: J_m 为电机轴转动惯量; B_m 为电机轴阻尼系数; θ_c 为转向盘转角; θ_m 为电机转角; T_s 为转矩传感器检测转矩; T_m 为电机电磁转矩; F_f 为齿条库仑摩擦力; T_{im} 为电机轴库仑摩擦转矩; K_c 为转矩传感器扭杆刚度; B_r 为齿条阻尼系数; r_p 为小齿轮半径; M_r 为齿条和车轮等效质量; p 为齿条位移; K_f 为电机反电势系数; R 为电机电枢电阻; L 为电机电感; u 为电机控制电压。

2.2 控制器模型

控制器模型由制定好的转向盘转矩特性模

块、PID 模块、电压限制模块、PWM 模块组成,如图 6 所示。

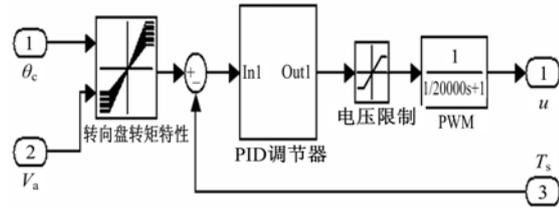


图 6 控制器模型

Fig. 6 ECU model

转向盘转矩特性根据图 4 制定,PID 调节器对目标转向盘转矩和实际转向盘转矩的偏差进行调节,电压限制模块将 PID 调节器的输出电压限制在正负 12 V 之内,PWM 模块等效为一延迟环节,延迟时间为 PWM 的一个周期,一般取 $1/20000$ s。

3 仿真研究

3.1 转向轻便性分析

为分析控制策略对转向轻便性的影响,进行了不加助力和加助力的仿真对比试验。试验条件为:车速=30 km/h、转向盘正弦角输入的幅值为 500° 、周期为 16 s。仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可见,进行助力后,转向盘上的转矩大大减少,提高了转向轻便性,特别是在大转角(图中为 360°)转向时,转向盘转矩进入饱和区,维持 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 不变,进一步改善了转向的轻便性。

另外,从图 7 中还可以看出,不进行助力时,当转向盘开始回正的瞬间,由于转向系统库仑摩擦转矩和阻尼转矩的方向改变,引起了转向盘转矩的波动。进行助力控制后,转向盘转矩变化没

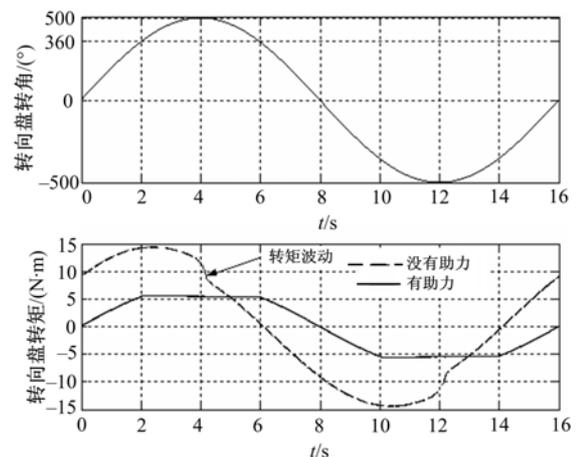


图 7 转向轻便性仿真结果

Fig. 7 Simulation result about steering easiness

有了波动情况,改善了驾驶员的手感。

更为重要的是,进行助力控制后,转向盘转角与转矩之间没有了相位延迟,提高了转向的快速响应性。

3.2 路感分析

为分析控制策略对路感的影响,进行了不同车速下的路感仿真对比试验。试验条件为:转向盘正弦角输入的幅值为 500° ,周期为 16 s;车速 V_a 分别为 10、30、50、70 km/h。仿真结果如图 8 所示。可见,随着车速的增加,转向盘上的转矩不断增加,从而增加了高速转向时的路感。

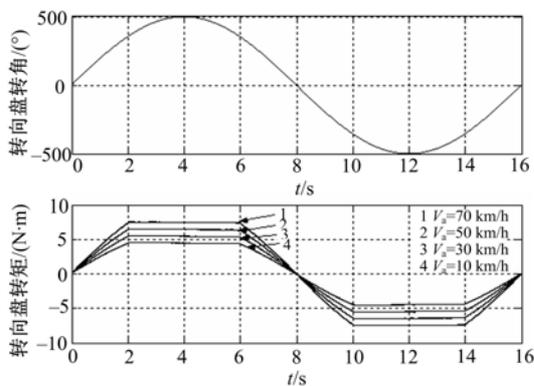


图 8 路感仿真结果

Fig. 8 Simulation result about road feel

3.3 转向盘转矩特性跟踪效果

为验证所设计的下层控制策略对目标转向盘转矩特性跟踪的效果,进行了 $V_a = 0$ km/h 到 $V_a = 70$ km/h 的系列转向仿真试验,仿真结果如图 9 所示。

将图 9 与图 4 进行对比发现,实际转向盘转矩特性与目标转向盘转矩特性非常接近,说明了

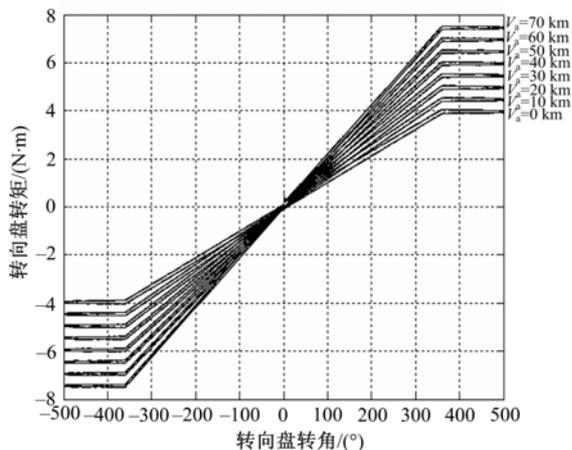


图 9 转向盘转矩特性跟踪效果

Fig. 9 Tracing effect of steering torque characteristic

所设计的下层控制策略是有效的。

3.4 转向系统参数变化对转向盘转矩特性的影响

在车速为 30 km/h 的情况下,将加在转向盘轴上的库仑摩擦分别调节为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$,此时驾驶员获得的转向盘转矩特性对比如图 10 所示。图 10 中两条曲线基本重合,可见转向系统参数变化对转向盘转矩特性没有影响。

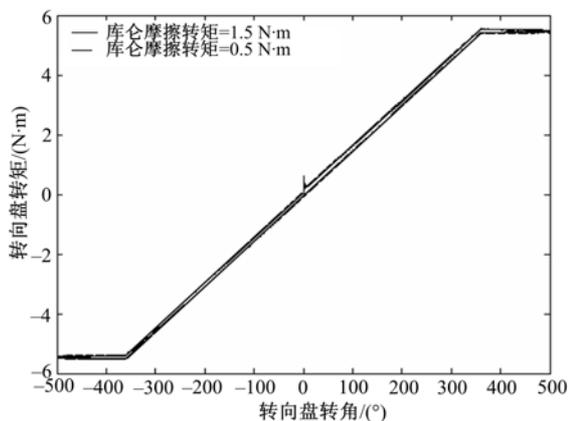


图 10 转向系统参数变化对转向盘转矩特性的影响

Fig. 10 Effect on the steering torque characteristic arose from the change of system parameters

3.5 路面冲击对转向盘转矩特性的影响

当汽车行驶在非平坦路面上时,一般不希望路面的冲击负荷传递到转向盘上,否则会引起驾驶员紧张和疲劳。为模拟路面的冲击负荷,仿真时在齿条上附加了频率为 10 Hz,幅值分别为 50 N 和 500 N 的正弦冲击负荷,转向时车速为 50 km/h,仿真出的转向盘转矩特性如图 11 所示。由图 11 可知,由路面不平度引起的冲击负荷很难

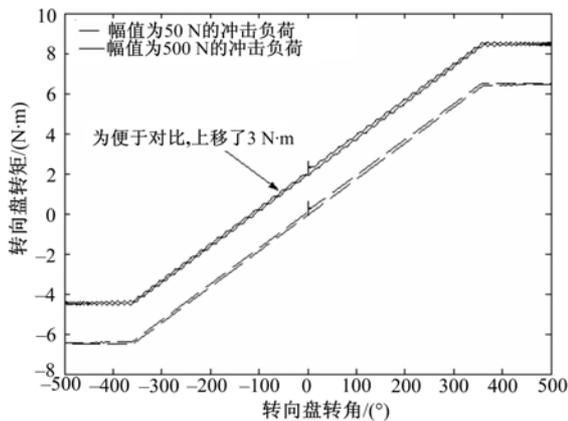


图 11 路面冲击对转向盘转矩特性的影响

Fig. 11 Effect on the steering torque characteristic arose from road pulse force

传递到转向盘上,驾驶员获得了光滑的手感。

4 结束语

针对传统助力转向系统不能对转向盘转矩直接进行控制的缺点,提出了以转向盘转矩为控制目标的控制策略,该控制策略设计灵活,调节方便,可根据驾驶员的要求灵活进行设计。仿真结果表明,该控制策略能有效解决转向轻便性和路感的问题,同时,控制性能还不受系统参数变化的影响,能抑制来自路面的冲击,具有稳定、平滑的转向盘转矩特性。

参考文献:

- [1] Dominke Peter, Ruck Gerhard. Electric power steering-the first step on the way to "Steer by Wire"[C]//SAE Paper,1999-01-0401.
- [2] Aly A Badawy, Farhad Bolourchi, Steve K Gaut. The design and benefits of electric power steering [C]//SAE Paper,973041.
- [3] Gary P Bertollini, Robert M Hogan. Applying driving simulation to quantify steering effort preference as a function of vehicle speed[C]//SAE Paper,1999-01-0394.
- [4] Kim Ji-Hoon, Sonf Jae-Bok. Control logic for an electric power steering[J]. Mechatronics,2002, 12: 447-459.
- [5] Aly Badawy, Jeff Zuraski, Farhad Bolourchi, et al. Modeling and analysis of an electric power steering system[C]//SAE Paper,1999-01-0399.
- [6] Hooman Mohammadi, Reza Kazemi. Simulation of different types of electric power assisted steering (EPS) to inveatigate applied torque positions' effects [C]//SAE Paper,2003-01-0585.
- [7] 施国标,申荣卫,林逸. 电动助力转向系统的建模与仿真技术[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(1): 31-36.
- Shi Guo-biao, Shen Rong-wei, Lin Yi. Modeling and simulation of electronic power engineering[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2007,37(1):31-36.

2006 年度国家科学技术奖揭晓

2007 年 2 月 27 日上午,2006 年度国家科学技术奖励大会在北京人民大会堂隆重举行。党和国家领导人胡锦涛、温家宝、曾庆红、李长春等出席大会并为获奖代表颁奖。我校任露泉、于吉红教授分别代表项目课题组登上主席台领奖。

2006 年度,我校共有 5 项成果荣获国家科学技术奖,获奖类别涵盖了国家三大奖种。其中,无机合成与制备化学国家重点实验室徐如人院士的“开放骨架磷酸铝新结构类型的开拓”研究成果获自然科学奖二等奖;地面机械仿生技术教育部重点实验室任露泉教授的“地面机械脱附减阻仿生技术”研究成果获技术发明奖二等奖;交通学院杨兆升教授的“城市道路智能交通系统理论体系、关键技术及工程应用”研究成果获科技进步奖二等奖;汽车动态模拟国家重点实验室胡平教授的“车身结构及部件快速精细设计、制造分析 KMAS 软件系统”研究成果获科技进步奖二等奖;计算机科学与技术学院刘大有教授与北京农业信息技术研究中心等单位合作研究的“农业专家系统研究及应用”成果获科技进步奖二等奖。

据悉,今年经国务院批准,国家自然科学奖授奖项目 29 项,其中:一等奖 2 项,二等奖 27 项;国家技术发明奖授奖项目 56 项,其中:一等奖 1 项(专用项目),二等奖 55 项(通用项目 41 项,专用项目 14 项);国家科学技术进步奖授奖项目 241 项,其中:特等奖 1 项(专用项目),一等奖 20 项(通用项目 11 项,专用项目 9 项),二等奖 220 项(通用项目 173 项,专用项目 47 项);授予 2 名外籍科学家中华人民共和国国际科学技术合作奖。