

基于主动转向干预的EPS系统转向盘力矩突变修正策略

魏建伟 魏民祥

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

摘要:在研究融合主动转向功能的电动助力转向系统实现原理的基础上,分析转向系统的力矩和角位移传递特性。针对主动转向干预时转向盘力矩发生突变的问题,提出一种适用于全车速范围的助力电机前馈助力修正策略。为验证所提出的前馈助力修正策略的修正效果,进行主动转向干预时转向盘力矩阶跃仿真试验。仿真结果表明:该策略有效地削弱了伴随主动转向干预同时出现的转向盘力矩突变,且在高速时该修正策略仍然有效,改善了主动转向干预时转向系统的转向路感。

关键词:电动助力转向;主动转向;转向盘力矩;修正策略;转向路感

中图分类号:U461.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)04-0572-05

Correction Strategy of Steering Wheel Torque for EPS System Based on Intervention of Active Steering

Wei Jianwei, Wei Minxiang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Implementation principle of an electric power steering (EPS) system integrated with active steering function is researched based on which transfer characteristics of torque and angle displacement for steering system are analyzed. To avoid mutations of steering wheel torque during the interference of active steering, a feed-forward assistant torque correction strategy for assist motor is presented, which can be used in the whole speed range. To verify the performance of the proposed correction strategy, step simulation tests of steering wheel torque during the interference of active steering are carried out. Simulation results indicate that mutations of steering wheel torque are reduced, the correction strategy can still be effective at high speed, and steering sense of the steering system during the interference of active steering is improved.

Key words: electric power steering; active steering; steering wheel torque; correction strategy; steering feeling

主动转向通过施加附加转角改变转向系统的角位移传递特性,增强转向系统在整车稳定性控制中的作用。电动助力转向(Electric power steering, EPS)通过提供助力力矩改变转向系统的力矩传递特性,获得良好的转向路感,满足安全驾驶的需要^[1-4]。融合主动转向功能的电动助力转向系统已经成为未来电动助力转向系统的发展方向。

根据牛顿第一定律,力是改变物体运动状态的原因。因此,主动转向通过施加附加转角改变转向系统角位移传递特性的同时,转向系统的力矩传递特性也发生了改变。依据转向系统的力矩传递特性,电动助力转向系统中驾驶员施加于转向盘的转向盘力矩,与助力电机提供的助力力矩共同克服转向阻力矩,并驱动前轮完成转向操作。主动转向施

加附加转角干预时,若助力电机仍采用原有的助力策略提供助力力矩,转向盘力矩会发生突变。定性而言,若主动转向施加的附加转角叠加于转向轴时与转向盘转角方向相同,转向盘力矩就会增大;若主动转向施加的附加转角叠加于转向轴时与转向盘转角方向相反,转向盘力矩就会减小。转向盘力矩的这种突变严重破坏了原有电动助力转向系统所具有的良好转向路感,不利于安全驾驶。

目前,国内对于融合主动转向功能的电动助力转向系统的研究还处于起步阶段,并已经申请了相关专利^[2]。而关于主动转向干预时助力电机的助力修正方面的相关文献经检索国内还未见报道。国际上,日本东京大学对主动转向干预时转向盘力矩的突变进行了研究,通过台架试验证实了主动转向干预时转向盘力矩会发生突变^[3-4]。同时,提出主动转向附加转角干预下,助力电机变助力增益的修正方法,并用来削弱转向盘力矩的突变。其方法是在助力电机常规助力增益的基础上,增加一个与附加转角有关的修正项,作为常规助力增益的系数。但在现有商品车上,电动助力转向系统的助力电机所采用的助力增益具有一定车速上限,这就意味着在助力车速范围内,该方法可以对主动转向干预时转向盘力矩的突变进行有效修正控制。而当行驶车速超出助力车速范围,特别是高速行驶时,由于助力电机的常规助力增益取值为零,该方法便不能对主动转向干预时转向盘力矩所发生的突变进行有效修正。

为解决汽车高速行驶时,主动转向附加转角干预时转向盘力矩的突变问题,本文依据转向系统的力矩传递特性,建立前馈助力修正模型,提出前馈助力修正策略,并进行主动转向干预时前馈助力修正策略修正效果仿真试验验证。

1 融合主动转向的EPS系统结构原理和动力学建模

1.1 系统结构原理

融合主动转向功能的电动助力转向系统的结构如图1所示。该系统主要包括两个执行电机:助力电机和主动转向执行电机,并采用两套减速机构。本文按照主动转向执行电机所实现的功能,将主动转向执行电机简称为转角电机。该系统本质上是在传统电动助力转向系统(以下简称为传统EPS系统)的基础上,增加一个转角电机和一套双行星轮系。双行星轮系是由两个单行星轮系串联而成,其在转向系统中的机械连接方式为:上排行

星轮系的齿圈固定,太阳轮与转向轴相连,行星架作为输出;下排行星轮系的齿圈与转角电机相连的减速机构相连,下排行星轮系的行星架与上排行星轮系的行星架直接相连,下排行星轮系的太阳轮作为输出,与转向轴相连。

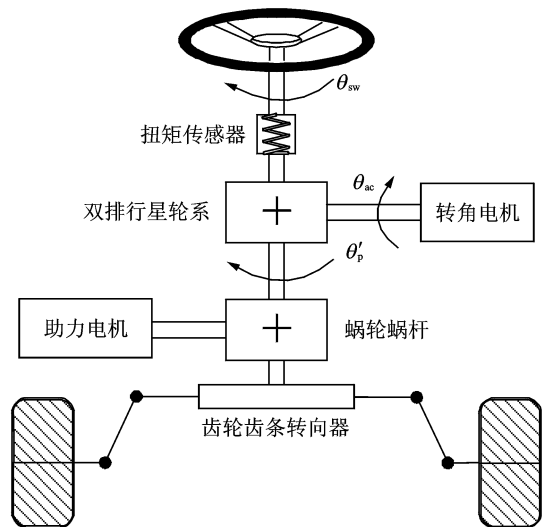


图1 融合主动转向功能的EPS系统

转向系统力矩和角位移传递特性如图2所示。由图2可知,主动转向根据变传动比控制和稳定性控制决策并施加的附加转角 θ_{ac} ,通过双行星轮系与转向盘转角 θ_{sw} 进行线性叠加,改变转向系统的角位移传递特性,增强转向系统在整车稳定性控制中的作用。而电动助力转向根据车速 v 和扭矩传感器输出 T_s ,决策常规助力力矩 T_m ;并根据主动转向施加的附加转角 θ_{ac} ,通过前馈助力修正模型决策助力修正力矩 ΔT_m 。助力电机通过施加合理的助力力矩 T_{as} ,改变转向系统的力矩传递特性,改善转向系统的转向路感。

1.2 系统建模

转向盘和转向轴模型可以表示为^[5]

$$T_d = J_c \ddot{\theta}_{sw} + B_c \dot{\theta}_{sw} + T_s \quad (1)$$

$$T_s = K_c (\theta_{sw} - \theta_s) \quad (2)$$

式中: T_d 为转向盘力矩输入; θ_{sw} 为转向盘转角; T_s 为扭矩传感器输出扭矩; J_c 、 B_c 和 K_c 分别为转向轴的转动惯量、阻尼系数和刚度系数。

主动转向施加的附加转角通过双行星轮系与转向盘转角进行线性叠加,叠加后的转向轴转角 θ'_p 为^[6-7]

$$\theta'_p = \theta_s + G_{afs} \theta_{ac} \quad (3)$$

式中: θ_{ac} 为附加转角; G_{afs} 为与转角电机相连的减速机构和双行星轮系的等效减速比。

下排行星轮系太阳轮输出力矩 $T_{1,dow}$ 为

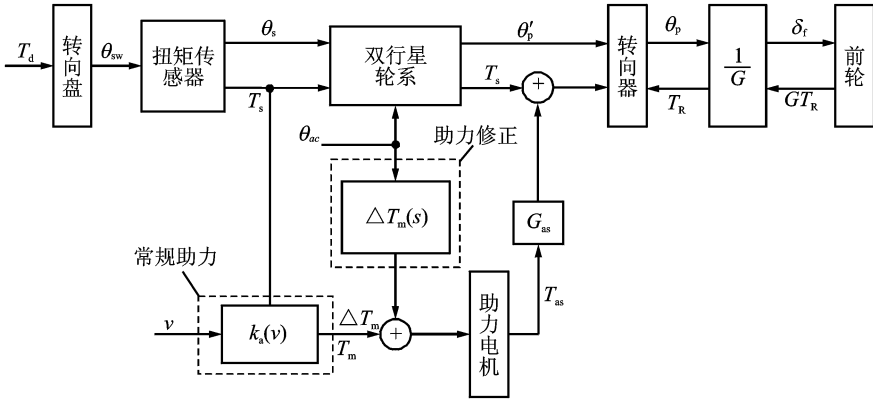


图2 转向系统力矩和角位移传递特性

$$T_{t,dow} = T_s = K_c(\theta'_p - \theta_p) \quad (4)$$

主动转向干预时,助力电机模型为

$$T_m + \Delta T_m = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + K_m(\theta_m - G_{as}\theta_p) \quad (5)$$

$$T_m = k_a T_s \quad (6)$$

$$T_{as} = K_m(\theta_m - G_{as}\theta_p) \quad (7)$$

式中: \$T_m\$ 和 \$k_a\$ 分别为电动助力转向所决策的常规助力力矩和助力增益; \$\Delta T_m\$ 为根据助力修正模型决策的助力修正力矩; \$\theta_m\$ 和 \$T_{as}\$ 分别为助力电机的转角和助力力矩; \$G_{as}\$ 为与助力电机相连的减速机构的减速比; \$\theta_p\$ 为转向小齿轮转角; \$J_m\$、\$B_m\$ 和 \$K_m\$ 分别为助力电机的转动惯量、阻尼系数和刚度系数。

齿轮齿条模型为^[5]

$$\frac{T_s}{R_p} + \frac{T_{as}G_{as}}{R_p} = M_R \ddot{x}_R + B_R \dot{x}_R + K_R x_R \quad (8)$$

$$\theta_p = \frac{x_R}{R_p} \quad (9)$$

式中: \$M_R\$ 为齿条质量; \$B_R\$ 和 \$K_R\$ 为齿条阻尼系数和刚度系数; \$x_R\$ 为齿条位移; \$R_p\$ 为转向小齿轮半径; \$G\$ 为转向系的机械角位移传动比。

2 前馈助力修正策略

鉴于传统 EPS 系统的助力控制技术已经成熟,为减少研发融合主动转向功能的 EPS 系统的成本,应尽量少改变传统 EPS 系统助力电机的控制器,以便于在传统 EPS 系统上拓展主动转向功能。考虑到转向系统的机械机构固定之后,与转角电机相连的减速机构、双行星轮系、与助力电机相连的减速机构、转角电机和助力电机的机电参数是无法改变的。因此,只能采用前馈助力修正方式对主动转向附加转角干预时,转向盘力矩的突变进

行修正,以期获得满意的转向路感。此外,关于传统 EPS 系统助力电机的常规助力控制方面的研究已有大量的成果可以借鉴^[8-11],此处仅研究助力电机的前馈助力修正策略。

由于主动转向干预所施加的附加转角改变了转向器小齿轮转角输出,进而改变了转向系统总转向系角位移传动比^[6]。忽略机械损耗和摩擦,可以得到主动转向施加附加转角干预时转向器小齿轮转角为

$$\theta_p \approx \theta'_p \approx \theta_{sw} + G_{afs}\theta_{ac} \quad (10)$$

则前轮转角 \$\delta_f\$ 为

$$\delta_f = \frac{\theta_p}{G} = \frac{x_R}{GR_p} \quad (11)$$

结合二自由度整车模型^[12],推导出转向器小齿轮转角到转向阻力矩的传递函数为

$$T_R(s) = \frac{P(s)}{Q(s)}\theta_p(s) \quad (12)$$

其中

$$P(s) = \frac{dK_f}{G^2}s^2 + \frac{dK_fK_r}{G^2v}\left(\frac{L_r^2}{I_z} + \frac{1}{m}\right)s +$$

$$\frac{dK_fK_rL_r}{G^2I_z}$$

$$Q(s) = s^2 + \left(\frac{K_fL_f^2 + K_rL_r^2}{I_zv} + \frac{K_f + K_r}{mv}\right)s -$$

$$\frac{K_fL_f - K_rL_r}{I_z} + \frac{K_fK_r(L_f + L_r)^2}{I_zmv^2}$$

式中: \$m\$ 为整车质量; \$I_z\$ 为整车绕 \$z\$ 坐标轴的转动惯量; \$L_f\$ 和 \$L_r\$ 分别为前后轴到质心的距离; \$K_f\$ 和 \$K_r\$ 分别为前后车轮的侧偏刚度; \$d\$ 为轮胎拖距; \$r\$ 和 \$\beta\$ 分别为横摆角速度和质心侧偏角; \$v\$ 为车速; \$s\$ 为拉普拉斯算子。

联立方程(10,12),可以得到主动转向干预时小齿轮转角到转向阻力矩的传递函数为

$$T_R(s) = \frac{P(s)}{Q(s)}[\theta_{sw}(s) + G_{afs}\theta_{ac}(s)] \quad (13)$$

由式(13)可知,主动转向干预时,转向阻力矩由两部分组成:(1)由驾驶员施加的转向盘转角引起;(2)由主动转向干预所施加的附加转角引起,这部分力矩反馈到转向盘,并体现为转向盘力矩的突变。因此,主动转向施加附加转角干预时,转向盘力矩会发生突变。转向盘力矩的突变量 T_{afs} 可以由式(14)进行估计

$$T_{\text{afs}}(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} G_{\text{afs}} \theta_{\text{ac}}(s) \quad (14)$$

为保证安全驾驶,在主动转向施加附加转角干预时,转向盘力矩不应发生较大的突变,同时,为感知主动转向附加转角的干预操作,并获得一定的路面信息,则要求转向盘力矩应有一定程度的变化。一般而言,这种变化在25%以内即可满足转向路感的要求^[5]。根据上述分析,可得主动转向干预时助力电机需要施加的参考修正力矩与附加转角的传递函数关系为

$$\Delta T_m(s) = \frac{(1-f)}{G_{\text{as}}} T_{\text{afs}}(s) = \frac{(1-f)}{G_{\text{as}}} \frac{P(s)}{Q(s)} G_{\text{afs}} \theta_{\text{ac}}(s) \quad (15)$$

式中: f 为驾驶员感知路面信息的感知系数,满足 $0 < f < 1$,可根据驾驶员需求进行调整,文中取 $f = 0.25$ ^[5]。

$\Delta T_m(s)$ 即为前馈助力修正模型的传递函数表达式。转角电机施加的附加转角 θ_{ac} 可以由传感器测得,或由主动转向决策的附加转角参考量获得。

由式(15)可以看出该修正模型不再受限于助力电机常规助力增益在助力车速范围外为零的限制,且在高速行驶时,该修正策略仍可以对主动转向干预时转向盘力矩所发生的突变进行有效修正控制。采用前馈助力修正模型进行助力修正控制的目标为:主动转向干预时,将转向盘力矩的突变量控制在驾驶员感知路面信息的需求范围内。

3 仿真试验验证及分析

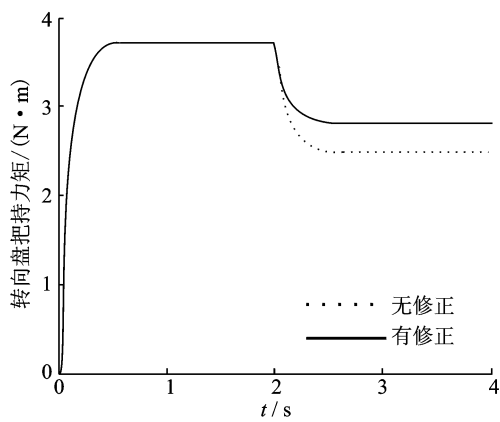
为验证所提出的前馈助力修正策略,进行主动转向附加转角干预时转向盘力矩仿真试验。仿真用到的参数如表1所示。

由于阶跃信号变化的突然性具有代表意义,若系统的阶跃响应品质良好,对其他信号的响应一般也较好。同时,参考现有阶跃仿真试验方法^[3-4],确定仿真工况为:首先将转向盘转动到 90° 位置后固定,在仿真第2s时刻,主动转向施加 -30° 的附加转角(叠加于转向轴后等效附加转角)。

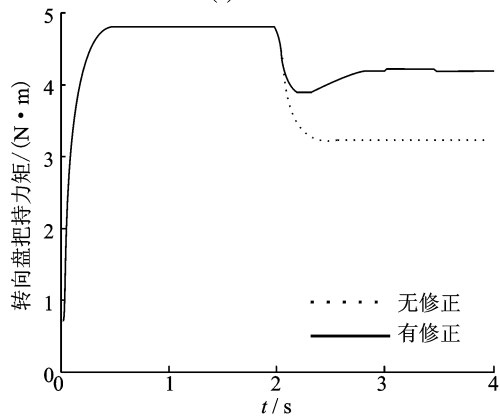
不同车速下,转向盘力矩的阶跃响应如图3所示。由图3可知,在无助力修正控制情况下,主动转

表1 仿真参数

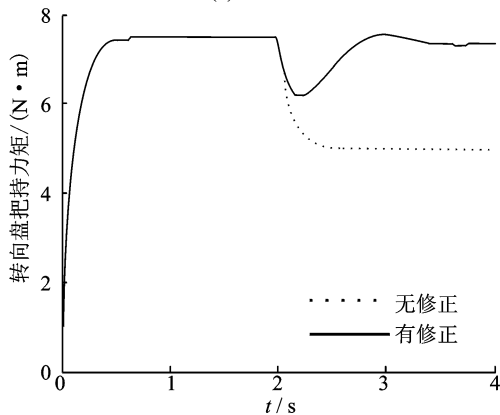
| 变量 | 数值 | 变量 | 数值 |
|--|-----------|--|----------|
| m/kg | 1 818.2 | $J_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 0.001 2 |
| $K_t/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$ | 62 618.0 | $B_c/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$ | 0.3 |
| $K_r/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$ | 110 185.0 | $K_c/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$ | 115 |
| L_t/m | 1.463 | $J_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 0.002 |
| L_r/m | 1.585 | $B_m/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$ | 0.003 4 |
| $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 3 885.0 | $K_m/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$ | 90 |
| d/m | 0.02 | M_R/kg | 28 |
| G | 16 | $B_R/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$ | 459 |
| G_{as} | 16.5 | $K_R/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$ | 91 061.4 |
| G_{afs} | -0.062 5 | R_p/m | 0.007 8 |



(a) $v = 40 \text{ km/h}$



(b) $v = 80 \text{ km/h}$



(c) $v = 160 \text{ km/h}$

图3 转向盘力矩阶跃仿真结果

向施加附加转角干预时,转向盘力矩发生较大的突变,且随着车速的增加转向盘力矩的突变量有增大的趋势。

由图3同样可以看出,在采取助力修正控制情况下,主动转向施加附加转角干预时,有效地减小了转向盘力矩的突变量,且随着车速的增加,减小量越大。

将转向盘力矩的突变量与主动转向干预前转向盘力矩的比值百分比定义为突变百分比,对图3结果进行定量对比分析,分析结果如表2所示。

表2 转向盘力矩突变量分析

| 车速/ (km·h ⁻¹) | 突变量/(N·m) | | 突变百分比/% | |
|------------------------------|-----------|------|---------|------|
| | 修正前 | 修正后 | 修正前 | 修正后 |
| 40 | 1.24 | 0.92 | 33.3 | 24.7 |
| 80 | 1.61 | 0.61 | 33.3 | 12.6 |
| 160 | 2.50 | 0.15 | 33.3 | 2.0 |

由表2可知,无助力修正时,转向盘力矩的突变量很大,且随着车速的增加突变量有所增大,但是不同车速下突变百分比均为33.3%,超出了驾驶员感知路面信息的需求范围,转向路感变差;而采用助力修正时,不同车速下转向盘力矩的突变量均有一定程度的减小,且随车速的增加突变量有所减小,但都在驾驶员感知路面信息需求的范围内,满足驾驶员对转向路感的要求。

由表2同样可知,车速为40 km/h时突变百分比为24.7%,转向盘力矩的突变量在驾驶员感知路面信息需求的范围内,同时减轻了驾驶员的体力负担,符合低速转向轻便性的要求;车速为160 km/h时突变百分比为2%,转向盘力矩突变量很小,有利于减轻驾驶员的精神负担,符合高速安全驾驶的要求。

因此,采用文中给出的助力修正策略,能有效削弱主动转向干预时转向盘力矩的突变,改善转向系统的转向路感。且在高速行驶时,该助力修正策略仍可以有效地对主动转向干预时转向盘力矩的突变进行修正,提高了高速行驶的驾驶安全性。

4 结 论

(1)建立了融合主动转向功能的电动助力转向系统的动力学模型,基于力矩传递特性构建了前馈助力修正模型,提出的助力电机前馈助力修正策略和助力修正模型,能够在全车速范围内实现助力修正控制。

(2)进行了主动转向干预时转向盘力矩仿真试验,仿真结果表明:所提出的助力修正策略有效地削弱了主动转向干预时转向盘力矩的突变,改善了转向系统的转向路感。

(3)本文给出的助力修正模型和修正策略,对开发融合主动转向功能的电动助力转向系统具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Kojo T, Suzumura M, Tsuchiya Y, et al. Development of active front steering control system [C] // SAE Technical Paper Series. USA: SAE Publication Group, 2005.
- [2] 施国标, 赵万忠, 李强, 等. 力与位移耦合控制的电动助力转向机构: 中国, CN201347125Y [P]. 2009-11-18.
- [3] Minaki R, Hoshino H, Hori Y. Ergonomic verification of reactive torque control based on driver's sensitivity characteristics for active front steering [C] // Proceedings of Vehicle Power and Propulsion Conference. USA: IEEE, 2009: 160-164.
- [4] Minaki R, Hori Y. Experimental verification of driver-friendly reactive torque control based on driver sensitivity to active front steering [C] // Proceedings of IECON 2009 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2009: 3077-3082.
- [5] Chabaan R, Wang L Y. Control of electrical power assist systems H-infinity design, torque estimation and structural stability [J]. JSAE Review, 2001, 22 (4): 435-444.
- [6] Millsap S A, Law E H. Handling enhancement due to an automotive variable ratio electric power steering system using model reference robust tracking control [C] // SAE Technical Paper Series. USA: SAE Publication Group, 1996.
- [7] Reinelt W, Klier W, Reimann G, et al. Active front steering (part 2): safety and functionality [C] // SAE Technical Paper Series. USA: SAE Publication Group, 2004.
- [8] 赵万忠, 施国标, 林逸, 等. 基于混合 H₂/H_∞ 控制的电动助力系统转向路感 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (4): 142-147.
- [9] Shimizu Y, Kawai T. Development of electric power steering [C] // SAE Technical Paper Series. USA: SAE Publication Group, 1991.
- [10] Tanaka M. Development of new controller with analog logic for electric power steering systems [J]. KOYO Engineering Journal English Edition, 1999 (155E): 23-28.
- [11] Kim J H, Song J B. Control logic for an electric power steering system using assist motor [J]. Mechatronic, 2002, 12(3): 447-459.
- [12] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.