

DOI: 10.3901/JME.2009.06.181

基于转向轻便性及回正性能设计的EPS应用*

赵林峰¹ 陈无畏¹ 秦明辉² 秦炜华¹

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009;

2. 广州智光电气股份有限公司 广州 510760)

摘要: 在建立电动助力转向系统(Electric power steering system, EPS)数学模型的基础上,将方向盘转矩传感器测得的转矩信号和估算的转向盘转角值相结合以判断转向的状态,然后运用模糊比例微分(Proportion derivative, PD)控制进行常规助力控制或回正控制。仿真结果表明,原地和低速条件下转向盘操纵转矩明显降低,车辆回正性能显著提高。并通过相关的软、硬件设计实现所设计的控制策略。为检验控制策略合理性和控制软件可行性以及自主设计控制单元(Electronic control unit, ECU)的可靠性,参照相关国家标准,进行无助力、自主研发的EPS实车对比试验,试验结果与仿真结果相吻合。

关键词: 电动助力转向 数学模型 控制策略 实车试验

中图分类号: U270.1⁺1 TP273⁺.24

Electric Power Steering Application Based on Returnability and Handiness

ZHAO Linfeng¹ CHEN Wuwei¹ QIN Minghui² QIN Weihua¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Guangzhou Zhiguang Electric Co. Ltd., Guangzhou 510760)

Abstract: Based on establishing the mathematical model of electric power steering system (EPS), a method for estimating the state of steering wheel by the combination of the moment signal measured by steering wheel moment sensor and the estimated steering angle, then the fuzzy proportion derivative (PD) control strategy is applied for conventional power-assited or self-aligning control. The simulation results show the steering moment decreases apparently under in-situ and low speed condition, the returnability is improved remarkably. Moreover, the electronic control unit (ECU) is designed on the basis of control strategy. For verifying the feasibility of software and reliability of ECU, the comparison vehicle test is carried out on the vehicle equipped with the self-developed EPS and without EPS respectively according to the relative national standards. The test results indicate that the practical effectiveness of self-developed EPS system is consistent with the simulation results.

Key words: Electric power steering system Mathematical model Control strategy Vehicle test

0 前言

电动助力转向(Electric power steering system, EPS)比传统的动力转向系统有更好的可控性,能较好地解决汽车转向“轻”和“灵”的矛盾。目前,国内外均对EPS进行了大量的研究,取得了较多的研究成果。PANG等^[1]直接从力矩本身入手,采用模

糊比例微分(Proportion derivative, PD)控制,获得了良好的控制效果。王其东等^[2]对EPS进行多刚体动力学建模和仿真,其结果表明EPS可以实现理想的助力特性。季学武等^[3]提出一种带有助力和阻尼两种模式的综合控制方式,台架性能试验验证表明,电动助力转向系统回正时的平稳性有所提高,但未给出具体的控制算法。徐建平等^[4]开发了一种基于转向盘转角估计的比例积分微分(Proportional integral derivative, PID)控制算法,以提高车辆回正性能,但只是在台架上采用改变弹簧刚度和系统摩擦的方

* 国家自然科学基金资助项目(50575064)。20080624 收到初稿, 20090304 收到修改稿

式模拟车速，忽略了整车的实时性对电动助力转向的影响。

基于驾驶员在操纵汽车时转向工况和回正工况相对独立，结合一些国外EPS厂商公布的技术资料信息和本课题组之前所做的电动助力转向研究工作^[5-7]，单独依靠转矩传感器的信号并不能准确判断转向的状态，故将其与转向盘转角的估计值相结合来判断转向的状态，然后运用模糊PD控制进行常规助力控制或回正控制。对控制策略进行仿真后，相应的开发了EPS ECU硬件和软件程序实现该控制策略并进行了实车试验验证。实车试验结果表明采用该控制策略可以实现较为理想的转向轻便性和回正性能。上述研究成果将为今后EPS的理论和试验研究提供借鉴。

1 EPS 的结构原理及数学模型

1.1 结构与工作原理

图1为转向轴助力式EPS，通常由转矩传感器、车速传感器、控制单元(ECU)、直流电动机、电磁离合器和减速机构等组成。转矩传感器测得的转向盘转矩信号和车速信号一同送给控制单元，经控制单元处理和计算后决定电动机控制电压的大小，然后通过电磁离合器和减速机构实现转向助力。

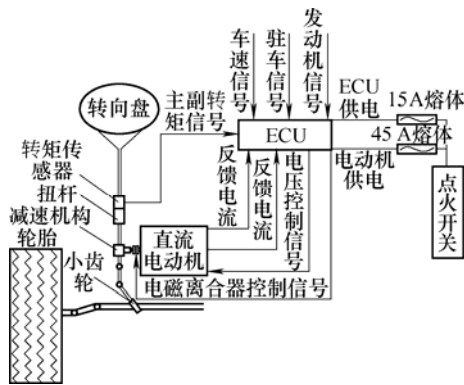


图 1 转向轴助力式 EPS

1.2 数学模型

整车 2 自由度转向模型如图 2 所示。

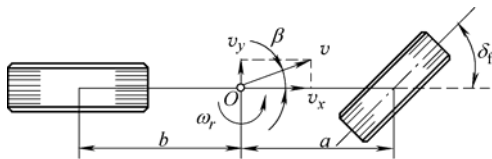


图 2 2 自由度汽车转向模型

该车辆模型动力学方程式

$$(k_f + k_r)\beta + \frac{1}{v_x}(ak_f + bk_r)\omega_r - k_r\delta_f = mv_x(\dot{\beta} + \omega_r) \quad (1)$$

- 式中 m ——汽车质量
- δ_f ——前轮转角
- β ——质心的侧偏角
- ω_r ——汽车横摆角速度
- v_x ——纵向车速
- k_f ——前轮侧偏刚度
- k_r ——后轮侧偏刚度
- a ——前轮到质心的距离
- b ——后轮到质心的距离

$$(ak_f - bk_r)\beta + \frac{1}{v_x}(a^2k_f + b^2k_r)\omega_r - ak_f\delta_f = J_z\dot{\omega}_r \quad (2)$$

- 式中 J_z ——横摆转动惯量

图1所示EPS的动力学方程式如下

$$T_h = J_h\ddot{\theta}_h + c_h\dot{\theta}_h + k_s(\theta_h - \theta_c) \quad (3)$$

- 式中 J_h ——转向盘的转动惯量
- c_h ——转向盘的阻尼系数
- θ_h ——转向盘转角
- T_h ——转向盘转矩
- k_s ——扭杆的刚性系数
- θ_c ——输出轴的旋转角

$$J_c\ddot{\theta}_c + c_c\dot{\theta}_c = k_s(\theta_h - \theta_c) + G_1k_m(\theta_m - G_1\theta_c) + T_{ext} \quad (4)$$

- 式中 k_m ——电机和减速机构刚性系数
- G_1 ——蜗轮蜗杆减速比
- c_c ——减速机构的阻尼系数
- T_{ext} ——路面作用于小齿轮的转矩
- J_c ——减速机构的转动惯量

$$T_{ext} = \frac{2}{G_2}dk_f\left(\delta_f - \frac{a}{v_x}\omega_r - \beta\right) \quad (5)$$

- 式中 G_2 ——转向轴到前轮的传动比
- d ——前轮拖距

而在原地以及极低车速下($v_x \leq 5 \text{ km/h}$)时

$$T_{ext} = k_c\theta_p \quad (6)$$

- 式中 k_c ——等效转向系刚度

$$J_m\ddot{\theta}_m + \mu_m\dot{\theta}_m = T_m - T_a \quad (7)$$

- 式中 θ_m ——电动机转角
- J_m ——电动机惯性矩
- μ_m ——电动机粘性摩擦因数
- T_m ——电磁转矩
- T_a ——助力转矩

$$T_m = \frac{K_a}{R}(U - K_b\dot{\theta}_m) \quad (8)$$

- 式中 K_a ——电动机转矩系数
- R ——电枢电阻

K_b ——电动势常数

$$T_a = G_1 k_m (\theta_m - G_1 \theta_c) \tag{9}$$

$$T_{or} = k_s (\theta_h - \theta_c) \tag{10}$$

式中 T_{or} ——转矩传感器测量值

由于转向小齿轮和输出轴之间是通过等速万向节连接的，它们两者可认为相等，即

$$\theta_c = \theta_z = G_2 \delta_f \tag{11}$$

式中 θ_z ——转向小齿轮转角

将式(2)~(11)合并，折算到转向小齿轮可得以下方程式

$$J_c \ddot{\theta}_p + c_e \dot{\theta}_p = T_a + T_{or} - T_{ext} \tag{12}$$

式中 J_c ——系统的总当量惯性矩

c_e ——系统的总当量阻尼因数

2 电动助力转向系统的控制策略

2.1 控制算法

EPS控制系统能根据转向盘转矩、车速等因素来判定其执行转向助力控制或回正控制。在不同车速下转向时，EPS提供合适的助力，减轻驾驶员的操纵负担。在低速行驶时保证汽车转向灵活轻便，在高速行驶时保证汽车转向稳定可靠，除此之外，电动助力转向还要提高汽车低速行驶时的回正性能和抑制高速行驶时的回正超调。基于以上要求，设计了电动助力转向控制策略，如图3所示。

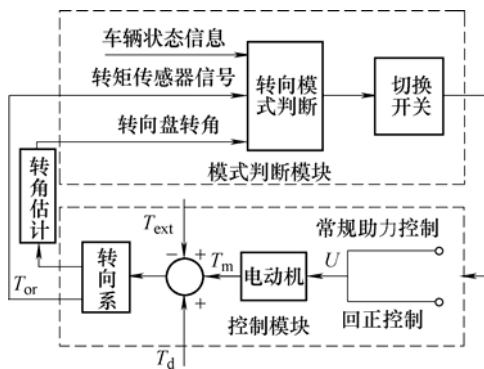


图3 控制策略框图

下面将分析如何进行转向模式的判断及控制模块的设计。

2.2 转向模式判断

胡建军等^[8]采用转向盘转角 θ_h 和转角变化率 $\dot{\theta}_h$ 的乘积来判断转向的状态是一种理想的方法， $\theta_h \cdot \dot{\theta}_h \geq 0$ 为转向工况， $\theta_h \cdot \dot{\theta}_h < 0$ 为回正工况。但本文所涉及EPS系统并没有转向盘转角传感器，故采用下述方法来识别转向工况还是回正工况。

由图1可知，实际中可以利用电机反馈电流和

反馈电压信号对电动机角速度进行估计。由于电动机电感较小，当忽略电感时，由式(8)可知电机转速为

$$\dot{\theta}_m = \frac{U - iR}{K_b} \tag{13}$$

式中 i ——电枢电流

通过积分环节，即可得到转向结束、开始回正时的转向盘转角近似值

$$\hat{\theta}_h = \frac{1}{G_1} \int \dot{\theta}_m dt \tag{14}$$

由式(14)求得的 $\hat{\theta}_h$ 是转向盘转角 θ_h 的估算值，将其和转矩传感器测得值相结合推算转向状态。下文将分析如何判断转向状态，选用右为研究对象(左转和右转相互对应)。

转向过程的确定。根据人的感觉灵敏度和试验，当转矩传感器检测到的转矩 T_{or} 小于设定的门限值 T_0 时电动机不提供助力，称这个门限值区间为死区范围。当 $T_{or} > T_0$ ，且 $\hat{\theta}_h \cdot \dot{\hat{\theta}}_h \geq 0$ (即转向盘转角增大)则为转向过程，此时实施常规助力控制。

回正过程的确定。当转向结束，转矩传感器检测的转矩值 T_{or} 减小，且 $\hat{\theta}_h \cdot \dot{\hat{\theta}}_h < 0$ (即转向盘转角减小)则为回正过程，此时实施回正控制。

2.3 常规助力控制器和回正控制器的设计

2.3.1 常规助力控制器的设计

EPS常规助力控制采用模糊PD控制，根据扭矩传感器测得的 T_{or} 和 \dot{T}_{or} 计算得出的来决定电动机输入的端电压的大小。其关系如下

$$U = K_{p1} T_{or} + K_{d1} \dot{T}_{or} \tag{15}$$

式中 K_{p1} ——控制器的比例系数

K_{d1} ——控制器的微分系数

常规助力控制器根据输入信号(即根据 T_{or} 和 \dot{T}_{or} 的大小、方向以及变化的趋势等特征)在线整定PD参数 K_{p1} 、 K_{d1} ，以期获得满意的控制效果。

这里我们定义了 T_{or} 和 \dot{T}_{or} 的模糊集为{NBB, NB, NM, NS, NSS, ZO, PSS, PS, PM, PB, PBB}; T_{or} 的论域为{-35, -28, -21, -14, -7, 0, 7, 14, 21, 28, 35}; \dot{T}_{or} 的论域为{-30, -24, -18, -12, -6, 0, 6, 12, 18, 24, 30}; H 的论域为{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5}, 取 T_{or} 、 \dot{T}_{or} 和 H 的隶属函数都为三角形隶属函数。具体的设计方法见文献[2]。

2.3.2 回正控制器的设计

汽车在不同的转向工况下，回正能力有所不同，而配备EPS的汽车更是如此。特别是原地转向和低速转向时，由于车轮与地面的摩擦力产生的力

矩大于回正力矩，会产生回正不足的情况，采取回正助力控制；汽车以一定的速度行驶时，回正力矩大于摩擦力矩，容易产生回正过量，这时利用电动机产生阻尼效应进行阻尼控制，避免转向盘强烈的抖动。比例部分对转向盘产生较大的回正助力转矩，求导部分产生较大的阻尼效果

$$U = K_{p2}\hat{\theta}_h + K_{d2}\dot{\theta}_h \quad (16)$$

式中 K_{p2} ——控制器的比例系数

K_{d2} ——控制器的微分系数

回正控制器根据输入信号(即根据 $\hat{\theta}_h$ 和 $\dot{\theta}_h$ 的大小、方向以及变化的趋势等特征)在线整定PD参数 K_{p2} 、 K_{d2} ，以期获得满意的控制效果。设计方法同常规助力控制器。

3 仿真计算及结果分析

转向系统相关的整车性能试验项目较多，在汽车行业标准QC/T480—1999中，采用转向盘平均作用力 $F_s(N)$ 和转向盘最大作用力 $F_m(N)$ 两项指标来评价转向轻便性，另外选取残留横摆角速度绝对值 $\Delta\omega_r$ 和横摆角速度总方差 $E\omega_r$ 来评价其回正性能。由于试验仪器测得的计量单位为 $N\cdot m$ ，为便于将仿真和实车试验进行对比，文中采用转向盘平均操纵转矩 $M_s(N\cdot m)$ 和转向盘最大操纵转矩 $M_m(N\cdot m)$ 来分析仿真及试验数据。

采用上述控制策略对汽车在无助力、有助力条件下分别进行原地转向、行驶转向的仿真计算。仿真计算所用到的相关参数如表1所示。

表 1 参数表

参数	数值
汽车质量 m/kg	1 030
横摆转动惯量 $J_z/(kg \cdot m^2)$	2 414
总当量惯性矩 $J_e/(kg \cdot m^2)$	0.06
扭杆的刚性系数 $k_s/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	90
总当量阻尼因数 $c_d/(N \cdot m \cdot s)$	0.3
等效转向系刚度 $k_e/(N \cdot m \cdot rad^{-1})$	605
蜗轮蜗杆减速比 G_1	16.5
转向轴到前轮的传动比 G_2	20
前轮到质心的距离 a/m	0.968
后轮到质心的距离 b/m	1.392
前轮侧偏刚度 $k_{\phi}/(N \cdot rad^{-1})$	35 000
后轮侧偏刚度 $k_r/(N \cdot rad^{-1})$	35 000
电枢电阻 R/Ω	0.168
电动机转矩系数 $K_a/(N \cdot m \cdot A^{-1})$	0.02
电动势常数 $K_b/(V \cdot s \cdot rad^{-1})$	0.02

3.1 轻便性仿真计算

为了便于与试验进行对比，分别进行了原地转向和10 km/h车速下双纽线转向轻便性仿真。仿真结

果如图4、5所示。

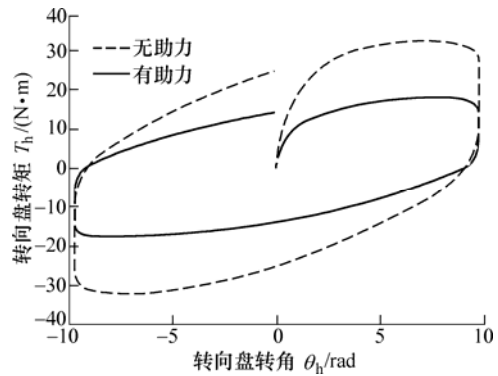


图 4 原地转向仿真结果图

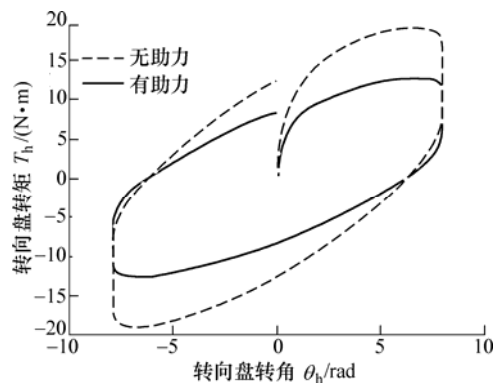


图 5 10 km/h 车速下双纽线转向仿真结果图

从图上可以看出，汽车原地转向时的转向阻力矩相当大，此时应尽可能发挥较大的助力转向效果，且助力矩增幅应较大，但助力矩增加到一定值时应保持恒定，以免助力电动机因负荷过大而出现故障；而行车转向时，转向阻力矩会降低，这时适当降低助力比，驾驶员可以明显感到路面反力的增加，确保安全驾驶。

表2、3分别为原地转向和行车转向的最大转向盘转矩以及平均转向盘转矩的仿真结果。

表 2 原地转向时转向盘转矩

车速 $v_x=0$	最大转向盘转矩	平均转向盘转矩
	$M_m/(N \cdot m)$	$M_s/(N \cdot m)$
无助力	32.4	17.8
EPS 助力	18.6	9.2

表 3 双纽线转向时转向盘转矩

车速	最大转向盘转矩	平均转向盘转矩
	$M_m/(N \cdot m)$	$M_s/(N \cdot m)$
$v_x=10 \text{ km/h}$		
无助力	19.1	10.7
EPS 助力	11.6	6.1

综上，在相同的路面和车速条件下，有电动助力时比无助力时的转向盘作用转矩明显降低，说明以上控制方案能有效解决转向轻便的问题。

3.2 回正性能仿真计算

在40 km/h车速下，回正仿真结果如图6所示。

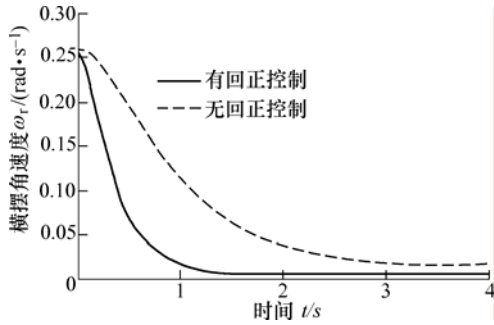


图6 回正仿真结果图

计算得出的典型回正特性参数如表4所示。

表4 回正特性参数表

车速	回正稳定时间	残留横摆角速度	横摆角速度总方差
$v_x=40 \text{ km/h}$	t/s	$\Delta\omega_r / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$E\omega_r / s$
无回正控制	3.2	0.018	0.21
有回正控制	1.8	0.008	0.12

根据QC/T 480—1999《汽车操纵稳定性指标限值与评价方法》，转向回正性的评价指标是松开转向盘3 s时的残留横摆角速度绝对值 $\Delta\omega_r$ 和横摆角速度总方差 $E\omega_r$ 。 $\Delta\omega_r$ 越小，说明汽车转向后自动回正，保持直线行驶的能力越好， $E\omega_r$ 越小，说明松开转向盘后，自动回正越迅速。

由表4可知，未加入回正控制时，残留横摆角速度绝对值及横摆角速度总方差较大，汽车回正缓慢。加入回正控制后，汽车能够迅速回正，保持直线行驶的能力较好。因此可以看出，加入回正控制可以明显改善汽车的回正性能。

4 EPS ECU 硬件和软件设计

4.1 电动助力转向控制单元设计

EPS控制单元(ECU)的结构如图7所示。转矩传感器、车速传感器及发动机的信号等，经过各路输入电路，再经微控制器处理之后，计算出目标电压，利用其驱动电路驱动电动机。微控制器采用飞利浦公司的高性能的32位ARM7芯片LPC2129。

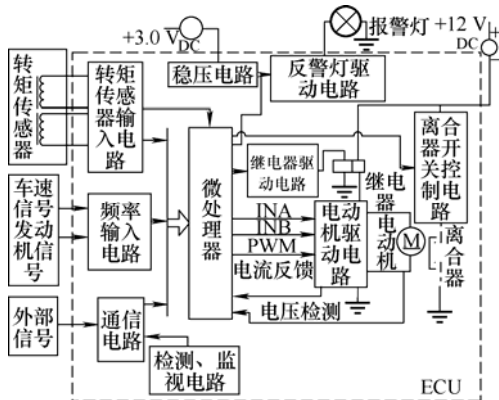


图7 EPS 控制系统(ECU)的结构示意图

4.2 程序设计

本文试验所用的转矩传感器为接触式转矩传感器，经仪器标定后得出电压与转矩的关系。使用LPC2129的ADC功能实现转矩信号的测量。车速信号和发动机转速信号经电路转换后可被微控制器识别。通过LPC2129的捕获功能得到其信号并计算。主程序流程图和中断服务程序流程图如图8所示。

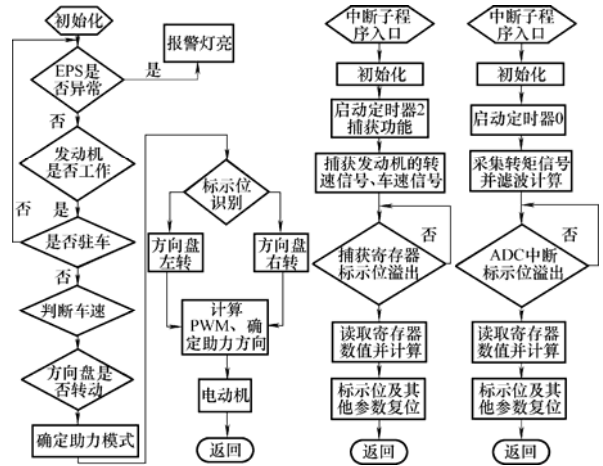


图8 程序流程图

5 试验研究

为检验控制策略、软件的可行性及ECU的可靠性，将自行研制的EPS装于某款国产轿车上，进行了实车道路对比试验。

5.1 试验仪器

试验仪器包含动态信号实时分析系统DSPS V5.0、非接触式车速仪、VG400陀螺仪、转向盘转角转矩测量仪、笔记本电脑、逆变器和电池组等。图9为试验仪器布置图，图10为现场数据采集情况。



图9 试验仪器布置图

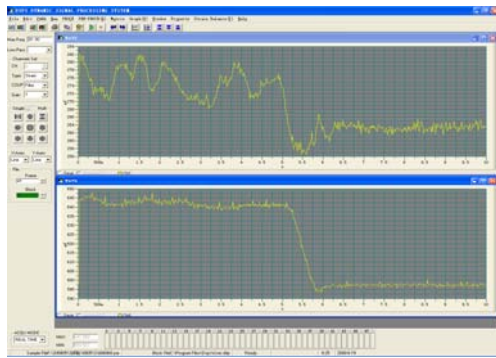


图 10 现场数据采集图

采集的数据为文本格式，经Matlab程序处理绘出原地转向力曲线图。试验及数据采集处理流程如图11所示。

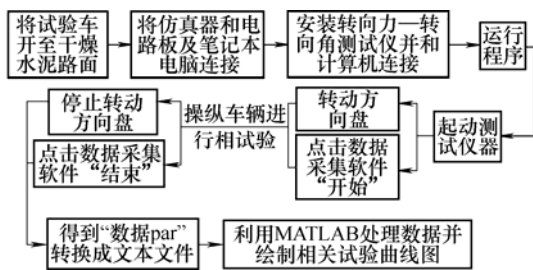


图 11 试验及数据采集处理流程图

5.2 试验条件

试验场地相当于C级路面，路面坡度、气温及风速均满足QC/T480—1999所述的试验条件。为了便于与仿真结果对比，选取具有代表性的原地转向试验、10 km/h车速下的双扭线转向试验、40 km/h车速下的回正试验，并对结果进行分析。

5.3 试验结果及分析

5.3.1 原地、10 km/h双扭线轻便性试验

无助力转向、自主开发的EPS原地转向和10 km/h双扭线转向时的轻便性对比试验结果如图12、13所示。与仿真结果图4、5相比较，转向盘作用转矩的趋势是一致的。

经计算得到无助力、自主开发的EPS原地转向试验对比如表5所示。双扭线试验对比如表6所示。

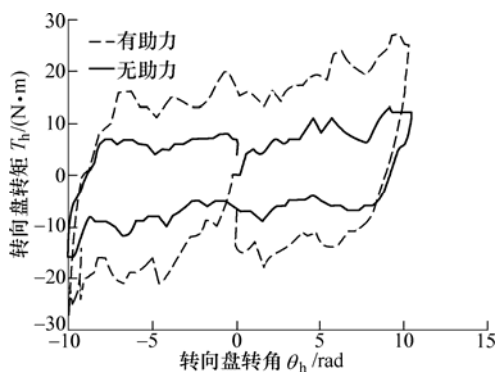


图 12 原地转向试验结果对比图

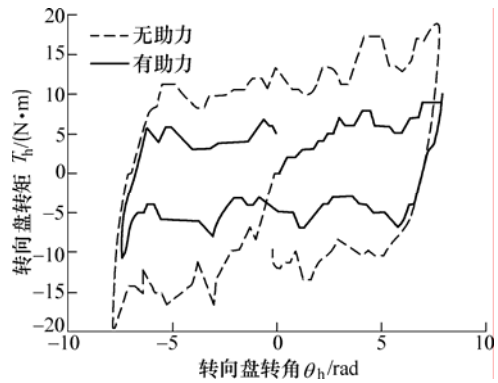


图 13 双扭线转向试验结果对比图

表 5 原地转向时转向盘转矩

车速 $v_x=0$	最大转向盘转矩 $M_m/(N \cdot m)$	平均转向盘转矩 $M_s/(N \cdot m)$
无助力	27.8	14.9
自主开发的EPS助力	15.3	7.3

表 6 双扭线转向时转向盘转矩

车速 $v_x=10$ km/h	最大转向盘转矩 $M_m/(N \cdot m)$	平均转向盘转矩 $M_s/(N \cdot m)$
无助力	19.9	10.3
自主开发的EPS助力	10.3	6.1

5.3.2 转向盘回正试验

无助力转向、自主开发EPS在车速40 km/h下的回正试验结果如图14所示，与仿真结果图6基本一致。

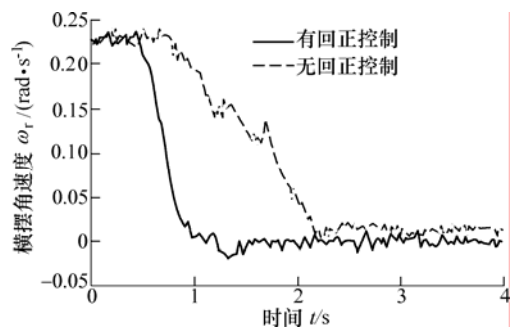


图 14 撒手回正试验

未加入回正控制时，横摆角速度幅值变化较慢、残留横摆角速度值较大，且其幅值变化曲线出现较大的抖动。而加入回正控制后，横摆角速度幅值变化较快、残留横摆角速度值较小，且其幅值变化曲线平滑。计算所得典型回正特性参数如表7所示。

表 7 回正试验特性参数表

车速 $v_x=40$ km/h	回正稳定时间 t/s	残留横摆角速度 $\Delta\omega /(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	横摆角速度总方差 $E\omega_r /s$
无回正控制	2.8	0.016	0.26
有回正控制	1.5	0.007	0.15

综合以上试验结果，可知自主开发EPS控制系

统控制效果良好, 提高了整车的操控性能。

6 结论

(1) 在对EPS进行动力学分析的基础上, 基于驾驶员在操纵汽车时转向工况和回正工况相对独立, 控制器根据输入的信号先判断转向的状态, 然后运用模糊PD控制进行常规助力控制或回正控制, 进行了仿真和试验研究。

(2) 对控制策略进行了仿真和试验验证, 并采集试验数据进行对比分析。试验结果表明中低速行驶转向具有良好的转向轻便性, 原地转向的最大转向盘转矩以及平均转向盘转矩分别降低了45%和51%(仿真结果对应的分别降低了42%和48%), 10 km/h双扭线转向分别降低了48%和41%(仿真结果对应的分别降低了39%和43%)。

(3) 试验结果表明回正性能有较大改善, 回正稳定时间、残留横摆角速度及横摆角速度总方差分别降低了46%、56%和42%(仿真结果对应的分别降低了44%、55%和44%)。

(4) 所设计的控制策略和软硬件是行之有效的。由于条件限制, 目前对EPS的研究, 主要集中在中低速的控制策略以及电路设计验证阶段。EPS中高速行驶条件下的性能还要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] PANG D Y, JANG B C, LEE S C. Steering wheel torque control of electric power steering by PD-control[C]// ICCAS2005. Korea, 2005, 2-5.
- [2] 王其东, 杨孝剑, 陈无畏, 等. 电动助力转向系统的建模及控制[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 1-4.
- WANG Qidong, YANG Xiaojian, CHEN Wuwei, et al. Modeling and simulation of electric power steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 1-4.
- [3] 季学武, 张德新, 陈奎元. 电动助力转向系统直流伺服技术的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 5-8.
- JI Xuewu, ZHANG Dexin, CHEN Kuiyuan. Study on DC servo technology for an electric power steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 5-8.
- [4] 徐建平, 何仁, 苗立东, 等. 电动助力转向系统回正控制算法研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(5): 557-559.
- XU Jianping, HE Ren, MIAO Lidong, et al. A study on returnability control algorithm for electric power steering system[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(5): 557-559.
- [5] BADAWY A, ZURASKI J, BOLOURCHI F, et al. Modeling and analysis of an electric power steering system[R]. SAE Paper 1999-01-0399, 1999.
- [6] 王启瑞, 黄森仁, 陈无畏, 等. 基于模糊自调整 PD 控制的 EPS 助力特性[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 1-4.
- WANG Qirui, HUANG Senren, CHEN Wuwei, et al. Study on EPS assisted steering characteristics using PD auto-tuning technique and fuzzy set[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 1-4.
- [7] 陈无畏, 王妍, 王启瑞, 等. 汽车电动助力转向系统的自适应 LQG 控制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 167-172.
- CHEN Wuwei, WANG Yan, WANG Qirui, et al. Adaptive LQG control for the electric power steering system of an automobile[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 167-172.
- [8] 胡建军, 卢娟, 秦大同, 等. 电动助力转向系统的建模和仿真分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(8): 10-13.
- HU Jianjun, LU Juan, QIN Datong, et al. Modeling and simulation of electric power steering system[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(8): 10-13.

作者简介: 赵林峰, 男, 1979 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学及控制。

E-mail: zhao.lin.feng@163.com

陈无畏, 男, 1951 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学与控制, 发表论文 100 余篇。

E-mail: cww@mail.ah.hf.cn