

文章编号:1671-6833(2007)04-0117-05

## 汽车电动助力转向系统助力特性研究及试验

孙立军, 陈 龙, 赵景波, 江浩斌

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 为了研究助力特性对汽车转向性能的影响, 建立了转角输入的电动助力转向系统的动力学模型, 选定了 EPS 的助力特性曲线; 并通过仿真, 验证了所建立模型的正确性; 最后利用自主开发的电动助力转向控制器进行了实车试验, 试验结果表明所设计控制器能很好地满足转向性能指标。

**关键词:** EPS; 助力特性; 仿真; 整车试验

**中图分类号:** Q 815 **文献标识码:** A

### 0 引言

与传统的液压转向系统(Hydraulic Power Steering System, 简称 HPS)相比, 电动助力转向系统(Electric Power Steering System, 简称 EPS)直接通过电动机的输出给驾驶员提供助力, 电动机只有在转向时才工作, 在不进行转向时几乎没有动力消耗, 使汽车具有更好的燃油经济性; 同时具有轻型小巧、装配迅速、易于调整、噪声及废油、废气污染小等优点。电动助力转向系统具有很大的发展前景。

电动助力转向系统主要由车速传感器、转向盘转动传感器、电子控制单元、功率放大模块和直流电动机等组成。电子控制单元(ECU)根据各传感器输出的信号计算所需的转向助力, 并通过功率放大模块控制直流电动机的转动, 电动机的输出经过减速机构减速增扭后, 驱动齿轮齿条机构, 产生相应的转向助力<sup>[1-2]</sup>。

助力特性作为电动助力转向的关键技术之一, 直接影响到整车的转向性能。理想的助力特性应能充分协调转向轻便性和路感的关系, 并提供给驾驶员与手动转向尽可能一致的、可控的转向特性<sup>[3]</sup>。笔者借助仿真和试验手段, 分析比较助力特性, 并据此设计 EPS 控制器。

### 1 EPS 动态模型

EPS 的机械部分如图 1 所示, 对 EPS 部件进

行简化, 根据牛顿运动定律建立各部分的动力学模型; 根据各部件之间的相互约束关系, 联立后得到整个系统的模型。

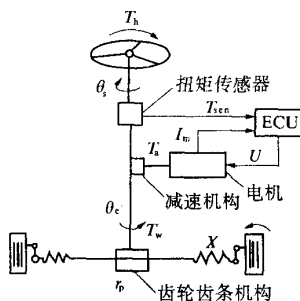


图1 EPS 动力学模型

Fig.1 Dynamic model of EPS

对于图1的EPS模型, 建立方程如下<sup>[4-5]</sup>。

$$J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s + K_s \theta_s = T_h + K_s x_r / r_p \quad (1)$$

式中:  $J_s$  为转向盘、输入轴的转动惯量;  $B_s$  为输入轴的黏性阻尼系数;  $\theta_s$  为输入轴的旋转角;  $T_h$  为作用在转向盘上的转向转矩;  $K_s$  为扭杆的刚性系数;  $x_r$  为齿条的位移;  $r_p$  为小齿轮半径。

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + K_m \theta_m = T_m + GK_m x_r / r_p \quad (2)$$

式中:  $J_m$  为电动机和离合器的转动惯量;  $B_m$  为电动机黏性阻尼系数;  $\theta_m$  为电动机的转角;  $T_m$  为电动机电磁转矩;  $G$  为蜗轮-蜗杆减速机构的减速比;  $K_m$  为电动机和减速机构的输出轴刚性系数。

收稿日期:2007-09-04; 修订日期:2007-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475121); 江苏省高新技术项目(BG2004025); 教育部博士点基金(20050299005)

作者简介: 陈 龙(1958-), 男, 江苏靖江人, 江苏大学教授, 博士生导师, 从事汽车动态设计及理论方面的研究工作; 孙立军(1980-), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生, 主要从事汽车电动助力转向研究。

$$M_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r + K_r x_r = GK_m/r_p \theta_m + K_s/r_p \theta_s - F_s \quad (3)$$

式中:  $M_r = m_r + J_e/r_p^2$  为减速机构、小齿轮和齿条等的当量质量;  $m_r$  为齿条及小齿轮的等效质量;  $J_e$  为输出轴的转动惯量;  $B_r = b_r + B_e/r_p^2$  为减速机构、小齿轮和齿条等的当量阻尼系数;  $b_r$  为齿条的阻尼系数;  $B_e$  为输出轴的阻尼系数;  $K_r = k_r + (K_s + G^2 K_m)/r^2$ ;  $p$  为小齿轮、齿条和轮胎的等效刚度系数;  $k_r$  为等效弹簧的弹性系数;  $F_s$  为路面的随机作用力。

得到 EPS 系统的状态方程为:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (4)$$

系统的输出方程为:

$$Y = CX + Du \quad (5)$$

其中: 状态变量  $x = [x_r \quad \dot{x}_r \quad \theta_m \quad \dot{\theta}_m]^T$ ;

控制输入量  $u = [\theta_s \quad \dot{\theta}_s \quad \ddot{\theta}_s \quad T_m \quad F_s]^T$ ;

输出量  $y = [T_h \quad T_{sen} \quad T_a \quad \dot{\theta}_m \quad x_r]^T$ 。

其中:  $T_{sen}$  为扭杆的反作用转矩;  $T_a$  为电动机输出转矩。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_r/M_r & -B_r/M_r & GK_m/M_r r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ GK_m/J_m r_p & 0 & -K_m/J_m & -B_m/J_m \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_s/M_r r_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_m \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} -K_s/r_p & 0 & 0 & 0 \\ -K_r/r_p & 0 & 0 & 0 \\ -GK_m/r_p & 0 & K_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} K_s & B_s & J_s & 0 & 0 \\ K_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

该系统有 5 个输入: 方向盘转角、方向盘转速、方向盘角加速度、电动机电磁转矩和路面的随机侧向力, 系统输出为方向盘转矩、扭杆的反作用转矩、电动机输出转矩、电动机转速和齿条位移。

### 3 EPS 助力特性曲线的选定

EPS 的助力特性曲线  $T_a$  有多种形式, 图 2 为三种典型的 EPS 助力特性曲线。图中助力特性曲线分成三个区域,  $0 < T_d < T_{d0}$  为无助力区,  $T_{d0} < T_d < T_{dmax}$  为助力变化区,  $T_{d0} \geq T_{dmax}$  为助力不变区<sup>[6]</sup>。

助力特性曲线参数初步选定: ①电机最大电流  $I_{max}$ , 由所选用的助力电机可知最大工作电流为 30 A; ②为了兼顾驾驶员的操纵手感, 转向系

统开始助力时的转向盘输入力矩  $T_{d0}$  为 1 N·m; ③转向系统提供最大助力时的转向盘输入力矩  $T_{dmax}$ , 根据台架试验及驾驶员手感选取 10 N·m。

仿真所采用的助力特性曲线如图 3 所示。

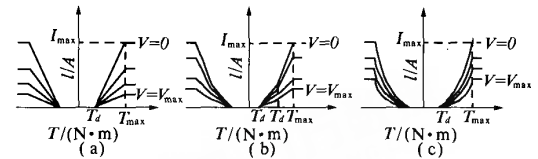


图 2 助力特性形式

Fig. 2 Assist characteristics of EPS

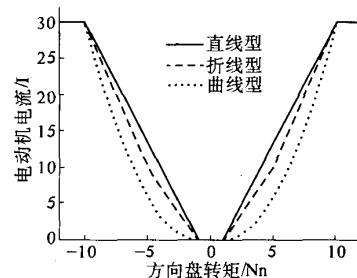


图 3 仿真中采用的助力特性曲线

Fig. 3 Assist characteristic used in simulation

### 4 仿真分析

对建立的 EPS 动态模型, 采用如图 3 所示的助力特性曲线, 在 MATLAB 环境下建立 EPS 的仿真模型(如图 4), 并在车速为 20 km/h 且无助力(如图 5)的情况下, 进行了蛇行仿真与实车试验对比(如图 5), 从图中可以看出, 仿真结果能很好的反映实际试验结果, 模型建立正确。

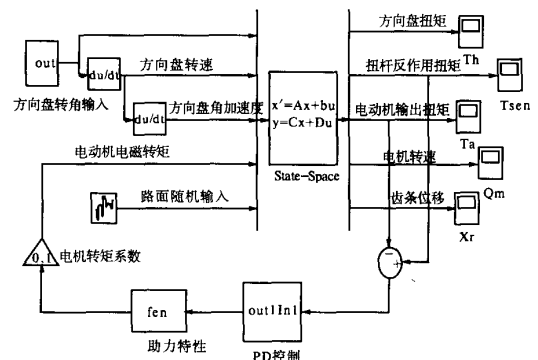


图 4 MATLAB 仿真模型

Fig. 4 MATLAB simulation model

对原地转向及车速为 20 km/h 的蛇行工况进行了仿真。仿真结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 和

图7可以看出,电动助力转向能显著地提高轻便性,同时,在原地转向过程中,直线型、折线型和曲线型的轻便性依次降低,但是三者的差别不大,这可以从图3看出,直线型的助力效果最大。转矩对转角的梯度<sup>[5]</sup>(直接反映路感)也相差不大;在蛇行仿真中,轻便性依然是直线型最好,但是随着车速的提高,路面阻力随之减小,所需的操作力也相应减小。在方向盘转角大于 $20^{\circ}$ 时,三者的操作力差异变大。因为操作力直接反映了路感,所以曲线型的路感明显优于前两者。

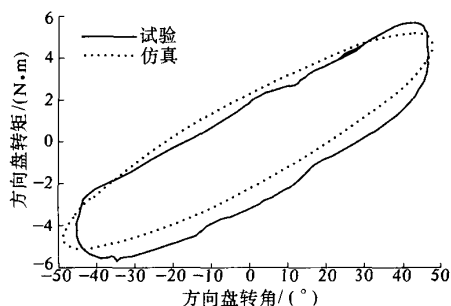


图5 仿真与试验结果比较

Fig. 5 Comparison between simulation and experiment

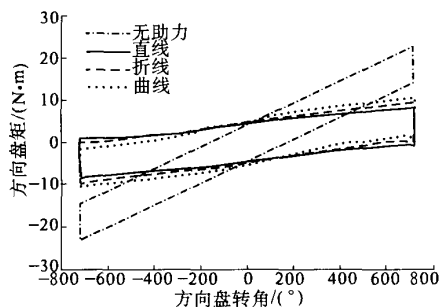


图6 原地转向仿真结果图

Fig. 6 Simulation results of static steering

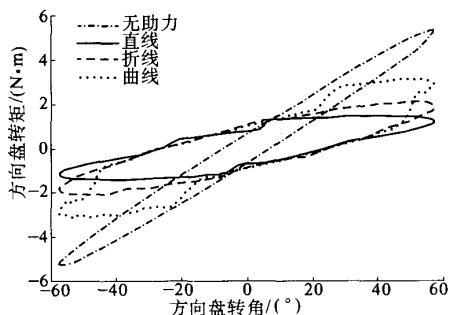


图7 蛇行仿真结果图

Fig. 7 Simulation results of snake driving

## 5 试验验证

对于低成本的经济型汽车,直线型助力特性曲线仍然具有较大的市场,我们从直线型助力特性曲线入手,设计了EPS控制器。试验采用的车辆是昌河北斗星(CH7140),采用自主开发的控制器,助力特性选取图3中的直线型。

所做试验分别为 GB/T 6323.5—94《转向轻便性试验》和 GB/T 6323.1—94《蛇行试验》。

双纽线试验结果如图8所示,由试验结果可以得出以下结论:①原车的转向扭矩的幅值比自己研发的控制器稍小,但均明显小于无助力,即转向轻便性方面具有很明显的优势;②转矩对转角的梯度,原车的控制器与自我研发的也基本一致。

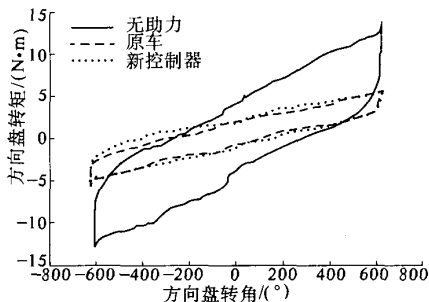


图8 双纽线方向盘转角-转矩图

Fig. 8 Experiment results based on 8 line driving

蛇行试验结果如图9~11所示,由试验结果,我们可以得出以下结论:①转向盘转矩为0时的汽车侧向加速度<sup>[7]</sup>,表征了汽车的回正性能,侧向加速度越小,回正性能越好。各个车速下,无助力最好,原车与新控制器类似;②侧向加速度为0处的转向盘转矩<sup>[7]</sup>表征了转向系中的库仑干摩擦,但它也受到系统阻尼与车辆相位滞后的影响。原车比新控制器稍轻,无助力最重;③转矩为0处的转向盘转矩梯度<sup>[7]</sup>,它是0处转向盘转矩随汽车侧向加速度的变化率,表征了“路感”。由于轻便性与路感的矛盾,无助力最好,原车和新控制器区别不大,但是随着车速的提高,无助力和有助力的差距在缩小;④在中高速阶段,引入一个0.1 g处的转向盘转矩梯度<sup>[7]</sup>,它是0.1 g处转向盘转矩随汽车侧向加速度的变化率,表征了刚离开直线行驶状况时的“路感”。由图11(a)可以看到,同样是无助力路感最强,原车和新控制器基本相同。

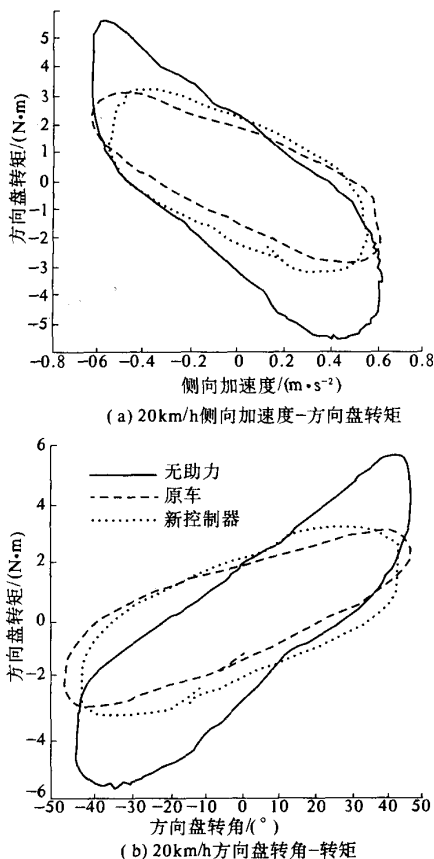


图9 20 km/h 蛇行试验结果图

Fig. 9 Experiment results of 20 km/h snake driving

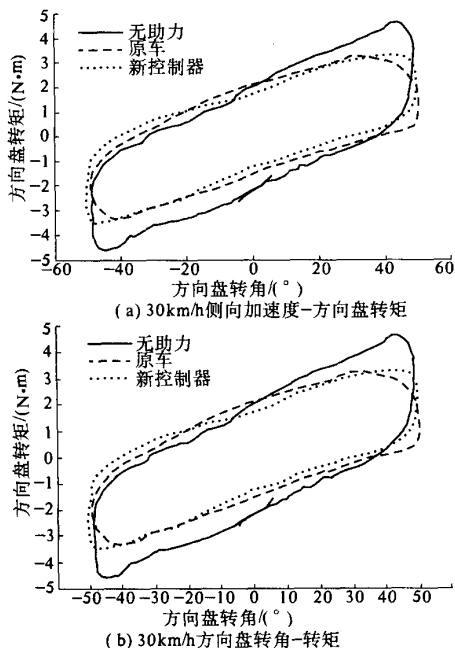


图10 30 km/h 蛇行试验结果图

Fig. 10 Experiment results of 30 km/h snake driving

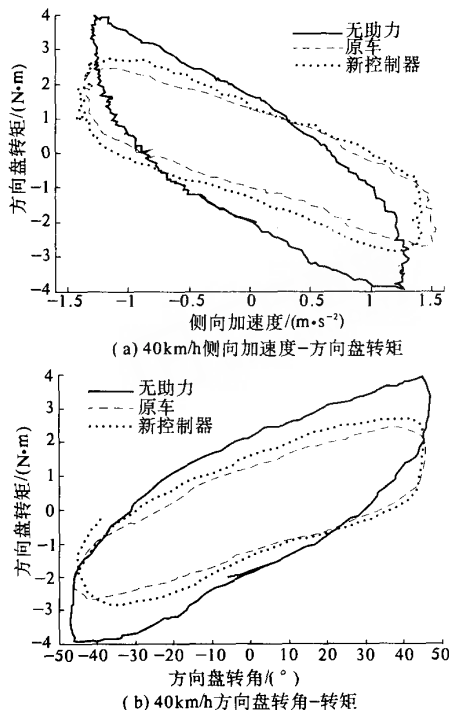


图11 40 km/h 蛇行试验结果图

Fig. 11 Experiment results of 40km/h snake driving

## 6 结论

笔者建立的转角输入 EPS 模型,在 MATLAB 环境下通过仿真比较了 3 种助力特性曲线对转向性能上的影响,并结合自主开发的基于直线型助力特性曲线的电动助力转向系统控制器,进行了实车试验,试验结果表明自主开发控制器的实际效果与原车控制器基本一致,能够实现现有的直线型助力特性曲线要求,为今后设计折线型甚至曲线型助力特性曲线提供了理论和实践基础。

## 参考文献:

- [1] BADAWY A, ZURASKI J. Modeling and analysis of an electric power steering system[J]. SAE paper No. 1999-01-0399, 1-5.
- [2] JIANG H B, ZHAO J B, Chen Long. Hardware design and experiment research of automotive electric power steering system[C]. 福州: 福建科学技术出版社, 2006. The 3rd China - Japan Conference on Mechatronics 2006 Fuzhou, 68-71.
- [3] ADAMS J J. Power Steering 'Road Feel' [J]. SAE Paper No. 830998, 1-5.
- [4] 徐建平, 何仁, 苗立冬, 等. 电动助力转向系统的建模与仿真分析[C]. 北京: 机械工业出版社 2003. 中国汽车工程学会 2003 学术年会, 654-657.

- [5] SONG J, BOO K, KIM H S et al. Model development and control methodology of a new electric power steering system [J]. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering, 967-975.
- [6] 施国标, 林逸, 张昕. 电动助力转向助力特性的若干问题 [C]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 中国
- 汽车工程学会 2003 学术年会, 714-718.
- [7] PEPPLER S A, JOHNSON J R WILLIAMS D E. Steering system effects on on-center handling and performance [J]. SAE Paper No. 1999-01-3765, 2-8.

## Study on EPS Assistance Characteristics and Vehicle Tests

SUN Li-jun, CHEN Long, ZHAO Jing-bo, JIANG Hao-bin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

**Abstract:** In order to study the influences of different characteristics of assistance on vehicle steering performance, we established the EPS model based on steering-wheel angle input, and selected the assistance characteristic curve. Also simulations were made to validate the correctness of the established model. At last, full-car experiments using self-designed controller were done. The results show that the self-designed controller can meet the request of steering.

**Key words:** EPS; assistance characteristic; simulation; full-car experiment

(上接第 99 页)

(3) 构造物两侧回填压实较为困难, 是含构造物路面产生病害的主要原因, 在行车荷载反复作用下, 构造物两侧路面将产生不均匀沉陷, 继而路面开裂, 基层土基逐渐软化, 加速路面结构破坏。如果将构造物两侧的土层用底基层材料置换, 则路面结构性能明显提高, 路表弯沉和拉应力显著降低。

### 参考文献:

- [1] LUNDVAL J F. Mitigation of roadway settlement above buried culverts and Piper [M]. 1997, FHWA-97/01 (Final Report): 29-32.
- [2] 高速公路丛书编委会. 高速公路路基设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 21-31.
- [3] 薛连旭. 涵洞、通道上的沥青路面结构研究 [D]. 西安: 西安公路交通大学硕士学位论文, 1998: 3-12.
- [4] 乐金朝, 丁武洋, 谢丽. 路面结构裂缝应力强度因子数值计算 [J]. 郑州大学学报: 理学版, 2002, 23 (2): 41-43.
- [5] BEER M D, KANNEMEYER L, FISHER C. Towards improved mechanistic design of thin asphalt layer surfacings based on actual Tyre/Pavement contact Stress-In-Motion (sim) data in south africa [C]. Capetown: 7th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa, 45.

## Study on Mechanic Behavior of Asphalt Pavement Structure on the Small-scaled Structure

XUE Lian-xu

(Road Engineering Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Tension stress in asphalt pavement above structure across roadway, such as culvert and underpass, has been calculated by FEM with elastic layered system theory and model test. The results show: tension stress on the surface of the pavement caused by the structure is greatly influenced by the thickness of the basement and the road base above the structure. The main reason of damage in the pavement above structure is that earthworks of the road base can not be well compacted.

**Key words:** small-scaled structure; asphalt pavement structure; mechanic behavior; finite element analysis