

# 电动助力转向系统仿真及控制策略研究

詹长书, 马振江, 徐宁

(东北林业大学 交通学院, 黑龙江, 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 电动助力转向系统(EPS)是复杂机电一体化的系统,在助力过程中控制策略起着决定性的作用. 在动力学分析基础上,根据电动助力转向系统的数学模型,建立了 EPS 的 Simulink 仿真模型. 在确定控制系统的结构后,对给定信号进行低通滤波,同时采用转向盘扭矩反馈和电流环反馈进行闭环控制,降低了系统的跟踪误差. 仿真和实验结果表明,采取适时主动阻尼的低通滤波控制措施降低了跟踪误差,助力效果明显,系统动态响应特性良好.

**关键词:** 电动助力转向系统 (EPS); 低通滤波; 扭矩反馈; 电流反馈

**中图分类号:** TB 114. 2; TP 391. 9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-0645(2012)07-0681-04

## Modeling and Control Strategy of Vehicle Electric Power Steering

ZHAN Chang-shu, MA Zhen-jiang, XU Ning

(Traffic College, North-East Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

**Abstract:** Electric power steering (EPS) is a complicated electro-mechanical system. Control strategy plays a decisive role in the process of assistance. Based on the kinetics analysis, mathematics model and Simulink based simulation model of electric power steering were established. Low-pass filter was used to reduce the tracking error for determined structure of the control system. Further, close-loop control was realized by using steering torque and motor current as feedback signals respectively. Simulation and experiment show that the proposed control strategy could reduce tracking error effectively, and the dynamic response of the system is good.

**Key words:** electric power steering (EPS); low-pass filtering; torque feed back; current feed back

电动助力转向系统(EPS)最早于 1988 年安装在日本铃木轿车上,由于电动助力转向系统比传统液压助力转向系统向有更多的优点<sup>[1-3]</sup>,如助力特性好,操纵稳定;EPS 只在转向时电动机才提供助力,比液压助力节能 3%~5%;结构紧凑,便于模块化安装;取消了液压管路,对环境无污染;低温工作性能好等, EPS 将在动力转向领域取代液压助力转向(HPS)与电控液压助力转向(EHPS)而占据主导地位.

电动助力转向系统在国外已大量装车,国内昌

河北斗星轿车、广州本田飞度和吉利豪情轿车上已经安装电动助力转向系统.

现有 EPS 控制主要集中在助力特性的研究<sup>[4-7]</sup>,对于低速时的主动回正和高速时的主动阻尼控制研究还很少,多数没有采用电流环反馈控制. 为了实现 EPS 的适时主动阻尼控制目标,必须制定相应的控制策略.

文中从 EPS 的建模和控制策略两方面内容进行探讨,并以台架实验验证了控制策略的有效性.

收稿日期: 2011-12-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DL11BB26)

作者简介: 詹长书(1970—),男,博士,副教授, E-mail: zhchsh3@sohu. com.

通信作者: 马振江(1980—),男,博士,讲师, E-mail: xuan2516@sina. com.

# 1 EPS 建模

## 1.1 EPS 数学模型

电动助力转向系统的典型结构如图 1 所示. 转向盘转矩传感器安装在转向轴上, 直流助力电机通过减速机构与转向轴连接. 转向时, ECU 不断接收转矩传感器和车速传感器的信号, 通过内部控制策略控制助力电机进行助力.

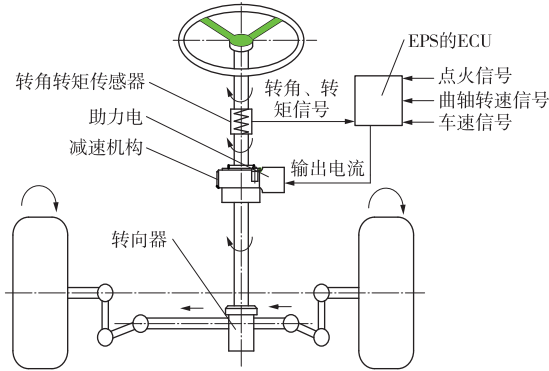


图 1 EPS 系统结构图  
Fig. 1 Structure of column-type EPS system

文中采用 Matlab/Simulink 对 EPS 系统进行建模. 为方便研究问题, 在建模时, 对 EPS 系统动力学模型进行了适当的简化, 将轮胎的质量向齿条等效, 忽略转向万向节的影响. 转向盘、力矩传感器和齿轮齿条的动力学方程为

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

$$T_s = K_s (\theta_{hdl} - \theta_s), \quad (2)$$

$$m_r \ddot{p} + B_r \dot{p} + F_{SAT} + F_{fric} \operatorname{sgn} \dot{p} = (T_s + T_{as} G) / r_p, \quad (3)$$

$$\theta_s = p / r_p. \quad (4)$$

式中:  $T_d$  为作用在转向盘上转向力矩;  $T_s$  为转矩传感器转矩值;  $J_c$  为转向盘转动惯量;  $B_c$  为转向盘阻尼系数;  $\theta_{hdl}$  为转向盘转角;  $K_s$  为转矩传感器扭转刚度;  $\theta_s$  为转矩传感器下端转向柱转角;  $m_r$  为齿条和车轮等效质量;  $B_r$  为齿条阻尼系数;  $F_{SAT}$  为转向回正力矩转化到齿条上的力;  $p$  为齿条位移;  $F_{fric}$  为等效到齿条上的系统摩擦力;  $T_{as}$  为电机输入减速器的转矩;  $r_p$  为小齿轮半径;  $G$  为电机减速器的涡轮蜗杆传动比.

### 1.1.1 转向回正力矩建模

转向回正力矩转化到齿条上的力由下式计算

$$F_{SAT} = k_r p, \quad (5)$$

式中  $k_r$  为回正力矩弹性系数, 该值随车速的变化而变化.

### 1.1.2 电机建模

本文中研究的 EPS 系统是转向柱助力形式, 采用永磁直流有刷电机, 额定电流 30 A, 额定电压 12 V. 直流电动机的动力学和电磁学方程为

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{as} = T_m, \quad (6)$$

$$T_m = k_t i, \quad (7)$$

$$T_{as} = K_m (\theta_m - \theta_s G), \quad (8)$$

$$L \dot{i} + R i + k_e \dot{\theta}_m = U. \quad (9)$$

式中:  $J_m$  为电机及蜗杆转动惯量;  $B_m$  为电机阻尼系数;  $\theta_m$  为电机转角;  $T_m$  为电机电磁转矩;  $k_t$  为电机电磁转矩系数;  $i$  为电机电流;  $K_m$  为电机传动轴刚度;  $L$  为电机电感;  $R$  为电机电阻;  $k_e$  为电机反电动势系数;  $U$  为电机电压.

### 1.2 Simulink 建模

根据上述的数学模型, 基于 Matlab/Simulink 建立了仿真模型, 如图 2 所示.

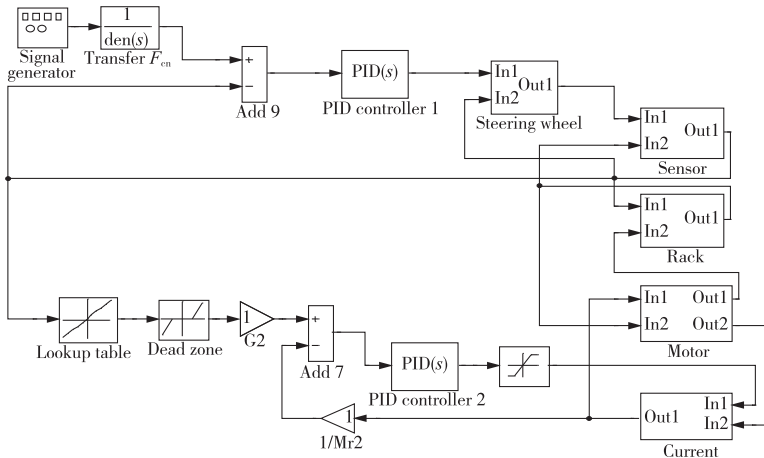


图 2 EPS 的 Simulink 仿真模型  
Fig. 2 Simulink based simulation model of EPS

## 2 控制策略

### 2.1 PID 控制

PID 控制又称偏差控制,是根据系统的误差(偏差),利用比例、积分、微分计算出控制量来进行控制。文中采用的控制策略如图 3 所示。

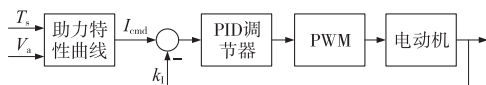


图 3 电动助力转向基本控制策略  
Fig. 3 Basic control strategy of EPS

### 2.2 有无滤波环节的比较

给定信号为方波信号,信号的幅值为  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 采用滤波环节后,信号变得平滑过渡。在相同的控制器参数下,系统的响应如图 4 所示。从误差曲线图 5 中可以得到系统响应误差从  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$  降为  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。此时控制器 PID 参数选择: $k_P$  为  $0.1$ ,  $k_I$  为  $50$ 。

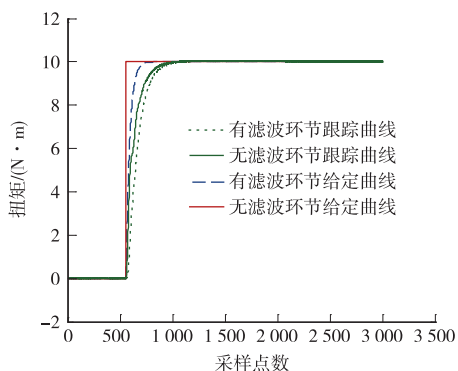


图 4 有无滤波环节扭矩跟踪特性曲线  
Fig. 4 Characteristic curves of torque tracking with and without filter

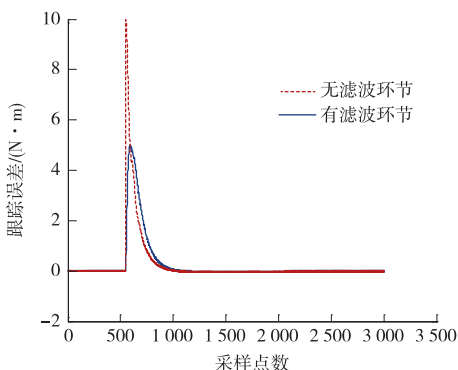


图 5 跟踪误差曲线  
Fig. 5 Tracking error curves

### 2.3 电流环反馈的比较

在给定信号为正弦信号的基础上,正弦信号幅

值为  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 频率为  $1 \text{ Hz}$ 。分别比较了有电流环和无电流环时系统的响应特性。在这两种情况下,电流环 PI 参数选择: $k_P=100$ ,  $k_I=1$ 。从图 6 中可以看到采用电流环后转向助力跟踪平滑,没有电流环反馈则出现跟踪震荡现象。由此可知采用电流环反馈可以使跟踪助力平滑无震荡。

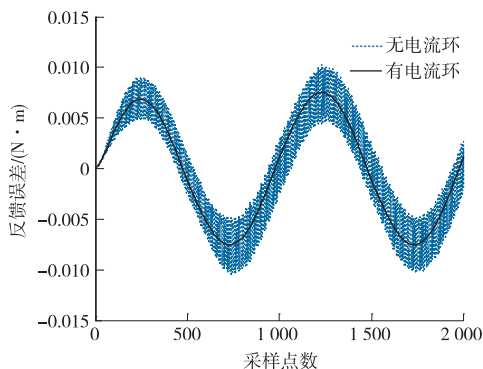


图 6 有无电流环反馈误差曲线  
Fig. 6 Error curve with current feed-back loop

### 2.4 扭矩环反馈的比较

系统采用了扭矩环反馈控制。扭矩环 PI 参数选择: $k_P=100$ ,  $k_I=10$ 。采用扭矩环及未采用扭矩环时系统跟踪误差曲线如图 7 所示。比较两条曲线可以得到系统的误差分别为  $\pm 0.08 \text{ N} \cdot \text{m}$  和  $\pm 2.00 \text{ N} \cdot \text{m}$  之间。由此可知,采用了扭矩反馈环节后,系统的扭矩跟踪误差明显减小。

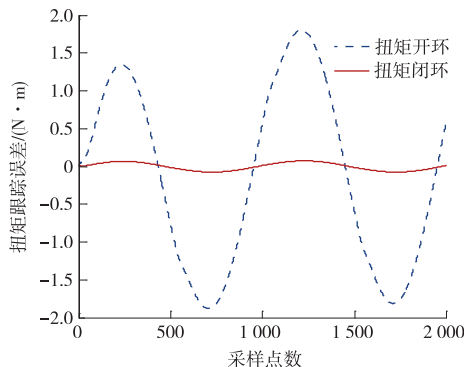


图 7 有无扭矩环反馈误差曲线  
Fig. 7 Error curve of tracking sine signal with torque feed-back loop

## 3 实验验证

在台架上进行了控制策略的验证实验,实验结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,采用上述的控制方法,曲线平滑过渡,没有发生振荡现象。另外,利用测力方向盘测得方向盘施加力矩从  $30 \text{ N} \cdot \text{m}$

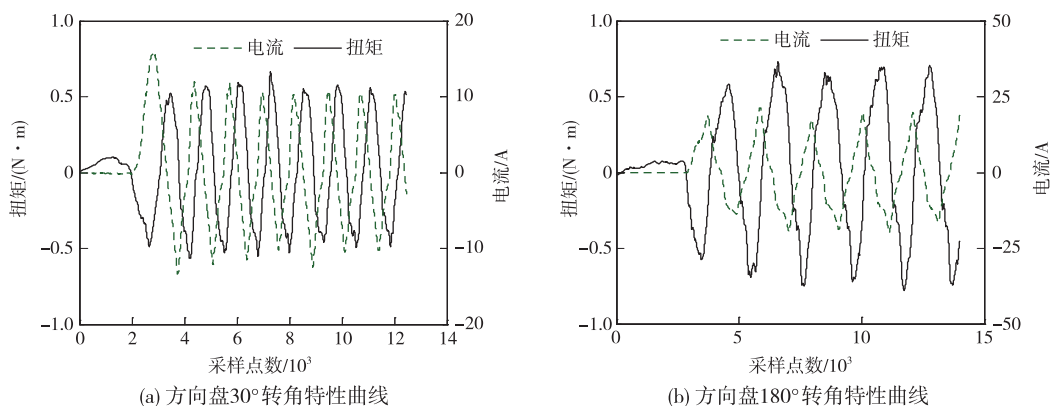


图 8 转角特性曲线

Fig. 8 Characteristic curve with steering wheel

降为  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ . 助力特性明显, 完全满足驾驶员对助力的要求.

## 4 结 论

根据建立的电动助力转向系统七自由度微分方程模型; 采用了设计的控制策略, 在仿真中首先对给定信号进行滤波处理, 比较了滤波前后系统特性. 然后分别选用扭矩信号和电流信号进行了 PI 反馈控制, 仿真结果显示系统动态响应平滑和跟踪误差明显减小. 台架试验表明, 提出的控制策略是有效的, 对电动助力转向的开发有指导意义. 研究的不足之处是还没有在实车上验证控制策略的有效性, 这需要在后续工作中加强.

### 参考文献:

- [1] 吕威. 电动助力转向系统稳定性和电流控制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.  
Lü Wei. Study on the stability and current control algorithm of electric power steering system [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [2] 申荣卫, 林逸, 台晓虹, 等. 电动助力转向系统建模与控制策略研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 160 - 163.  
Shen Rongwei, Lin Yi, Tai Xiaohong, et al. Research on modeling of electric power steering system and control strategy [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 160 - 163. (in Chinese)
- [3] 雷明森, 向铁明. 汽车电动助力转向的控制策略 [J]. 公路与汽运, 2008, 4(7): 20 - 22.

Lei Mingsen, Xiang Tieming. Control strategy of the electric booster steering system [J]. Highways & Automotive Applications, 2008, 4(7): 20 - 22. (in Chinese)

- [4] 余树桥, 赵燕. 电动转向器的动力学建模和分析 [J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(3): 34 - 36.  
Yu Shuqiao, Zhao Yan. Dynamics modeling and analysis of electric power steering [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2005, 20(3): 34 - 36. (in Chinese)
- [5] 谢刚. 汽车电动助力转向系统的设计与控制技术研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.  
Xie Gang. Research on design method and control technology for electric power steering system [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese)
- [6] 吴文江, 季学武, 杜彦良. 电动转向控制系统跟踪性能研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 77 - 80.  
Wu Wenjiang, Ji Xuewu, Du Yanliang. Development of tracking performance for electric power steering control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 77 - 80. (in Chinese)
- [7] 赵万忠, 施国标, 林逸, 等. 循环球式 EPS 系统助力特性控制策略研究 [J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(8): 702 - 706.  
Zhao Wanzhong, Shi Guobiao, Lin Yi, et al. A Study on the control strategy of power characteristics of recirculating ball-type electrical power steering system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(8): 702 - 706. (in Chinese)

(责任编辑: 孙竹凤)