

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.016

# 汽车电动助力转向系统控制现状分析

王旭斌<sup>1</sup>, 王生昌<sup>2\*</sup>

(1. 河南交通职业技术学院 汽车学院, 河南 郑州 450000; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**针对改善电动助力转向系统的轻便性、回正性及鲁棒性和整车稳定性的问题,在分析 EPS 基本工作过程和建立动力学模型的基础上,对其关键控制内容的现状进行了深入研究和比较,提出了各控制内容研究的热点和难点,指出了 EPS 控制趋势是充分利用系统的工作特性,通过智能控制及优化算法兼顾了转向系统和整车性能的提高。利用动力学模型、助力特性曲线查表和电机 PID 控制建立了 simulink 仿真模型,研究表明,动力学参数值会影响系统的稳定性、PID 控制参数会影响助力电流的跟随性、助力特征会改变不同阻力矩和车速下的转向轻便性和路感。该建模仿真过程可作为开发相关控制策略的参考。

**关键词:**EPS;控制内容;控制策略;建模仿真

中图分类号:U463.4;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1237-05

## Analysis of current control status of the electric power steering system

WANG Xu-bin<sup>1</sup>, WANG Sheng-chang<sup>2</sup>

(1. Department of Automobile Engineering, Henan Communication Vocational and Technical College, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Automobile, Chang'an university, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at improving the steering agility, returnability, robustness of the electric power steering and the stability of vehicle, based on working principle and dynamic model of the EPS, the key control technologies were researched and compared, the research hotspot and difficulty were pointed out. The control trend of EPS that the vehicle performance and steering performance were same considered by using EPS working character, intelligent control and optimization algorithm was proposed. The comprehensive simulink model was built by combining dynamic model, assist curve table with the motor PID control. The results indicate that the dynamic parameter affects system stability, the different PID control parameter influences the following behavior of DC current, assist characteristic valve reflects different steering agility and road feel for different steering resisting torque and speed. The simulation process can be referenced when developing the control strategy.

**Key words:** EPS; control item; control strategy; modeling simulation

## 0 引言

转向系统存在着轻便性和灵活性的矛盾,电动助力转向系统(EPS)可以很好地实现所设计的理想助力特性,给驾驶员提供良好路感,保证汽车低速时的转向轻便性以及高速时的方向稳定感<sup>[1-2]</sup>,在目前乘用车上广泛采用。EPS 最根本是实时对助力电动机电流方向和大小的控制,在系统机械部件一定的情况下,对该系统控制的研究主要集中在模式识别、基本助力特性、回正控制、助力补偿以及无转角传感器下的参数估计和

控制。设计开发以上控制项目的控制策略需要通过转向系统的性能评价指标来衡量,各性能指标的评价方法和试验有多个方面,可根据 EPS 系统的动力学方程及控制策略建立相应侧重点的 Simulink 模型或结合整车动力学模型、以规定的试验方法进行设置仿真分析。

本研究分析相关方面的研究情况,指出研究的难点和方向,并通过举例说明开发仿真过程。

## 1 EPS 系统组成及动力学模型

常见的转向柱助力式 EPS 主要包括转向盘及转

收稿日期:2016-02-24

作者简介:王旭斌(1979-),男,河南南阳人,工学硕士,讲师,主要从事车辆动力学控制与仿真方面的研究。E-mail:xbwang1979@126.com

通信联系人:王生昌,男,教授,硕士生导师。E-mail:820243302@qq.com

向柱、齿轮齿条式转向器、转矩传感器、电动机、减速机构、电控单元(ECU)以及车速传感器。当驾驶员转动方向盘时,转矩传感器将采集到的作用于转向柱上的转矩信号传给 ECU, ECU 再综合车速传感器等信号,确定电机的旋转方向以及电流大小,控制电机输出扭矩。随着控制项目及精度的要求提高,该系统的传感器信号数目增加及控制策略的变得复杂了。

电动助力转向系统主要是用来辅助驾驶员克服转向阻力矩的,阻力矩主要形成因素有:车轮与地面的摩擦、轮胎力和定位参数所形成的回正力矩、转向传动系统中存在的各种类型的摩擦力和力矩。阻力矩是随车速、转向角、轴荷等变化的,很难用精确的公式计算出。由于汽车可控行驶时侧向加速度通常不超过 0.4 g,在该工况下,轮胎拖距近似为常数,则可认为回正力矩与侧向力成正比,并且在一定车速下,侧向加速度与前轮转角基本上成线性关系,因此回正力矩与前轮转角近似成正比,进而回正力矩近似与齿条位移成正比,故将回正力矩等效到齿条上,并用弹簧模拟是可行的;将转向系统各部分的摩擦力等效到齿条上用  $F_f$  表示。在仿真中,也常采用车辆动力学仿真软件 ADAMS、Carsim、veDYNA 或轮胎模型等模拟计算阻力矩。

为设计仿真验证系统的各项控制策略,根据牛顿力学定律,建立 EPS 的动力学模型如下:

转向盘与上转向柱方程:

$$J_h \ddot{\theta}_s + b_h \dot{\theta}_s = T_d - T_s \quad T_s = K_s \left( \theta_s - \frac{x}{r} \right) \quad (1)$$

助力直流电机方程:

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = T_m - T_a$$

$$T_a = K_m \left( \theta_m - \frac{x}{r} i_m \right)$$

$$T_m = K_a I \quad L \dot{I} + R I + K_v \dot{\theta}_m = U \quad (2)$$

下转向柱与输出轴方程:

$$J_c \ddot{\theta}_e + b_e \dot{\theta}_e + T_w = T_s + i_m T_a \quad (3)$$

齿条方程:

$$m \ddot{x} + b_r \dot{x} + K_r x + F_f \text{sgn}(\dot{x}) = T_w / r \quad \theta_e = \frac{x}{r} \quad (4)$$

如考虑式(1)中的  $J_h$  和  $b_h$  为转向盘及上下转向柱的总惯量和阻尼,式(3,4)合并为齿条方程:

$$m \ddot{x} + b_r \dot{x} + K_r x + F_f \text{sgn}(\dot{x}) = \frac{K_s}{r} \left( \theta_s - \frac{x}{r} \right) + i_m \frac{K_m}{r} \left( \theta_m - \frac{x}{r} i_m \right) \quad (5)$$

式(1 ~ 5)中: $\theta_s, \theta_e, \theta_m$ —转向盘,输出轴和电动机的转角; $J_h$ —转向盘等效转动惯量; $b_h$ —转向盘等效阻尼系数; $T_d$ —转向盘输入转矩; $T_s$ —转矩传感器所测的转向盘输出转矩; $K_s$ —扭杆的扭转刚度系数; $x$ —齿条位移; $r$ —小齿轮半径; $J_m$ —电动机惯性矩; $b_m$ —电动机粘性阻尼系数; $T_m$ —电动机输出转矩; $K_m$ —电机和减速机构刚性系数; $i_m$ —减速机构减速比; $K_a$ —电机电磁转矩系数; $U$ —电机电压; $I$ —电机电流; $L$ —电感; $R$ —电枢电阻; $K_v$ —反电动势系数; $J_c$ —下转向柱等效转动惯量; $b_e$ —下转向柱阻尼系数; $T_w$ —作用在输出轴上的反作用力矩; $m$ —齿条质量; $b_r$ —齿条阻尼系数; $K_r$ —等效弹簧刚度; $T_a$ —电动机助力转矩。

## 2 控制内容及策略

ECU 内的控制软件通过控制助力电机电流实现转向或回正时的助力或阻尼。软件的上层控制策略用来确定目标电流,包含模式识别、助力控制、回正控制、阻尼控制、惯性补偿、阻尼补偿、摩擦补偿、相位补偿等。下层控制策略用来对电动机目标电流的跟踪。

EPS 控制内容及关系如图 1 所示。

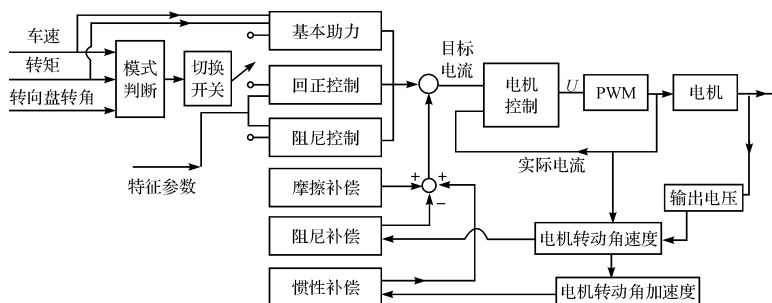


图 1 EPS 控制内容及关系

### 2.1 模式判断

转向系统的运动是由转向系统操纵力矩、助力矩、阻力矩以及转向系统当前的运动状态决定的,当操纵力矩与助力矩的合力矩与车轮的回正力矩方向相同时为回正状态,反之则为转向状态。当操纵力矩方向和转

向盘转角方向相同,操纵力矩与回正力矩方向相反时,这种称之为被动回正。当驾驶员反方向操纵转向盘时,在回正力矩和驾驶员操纵力矩的共同作用下,转向盘回到初始的中心位置,这种称为主动回正。

EPS 工作时,首先判断转向模式,其流程如图 2 所示。

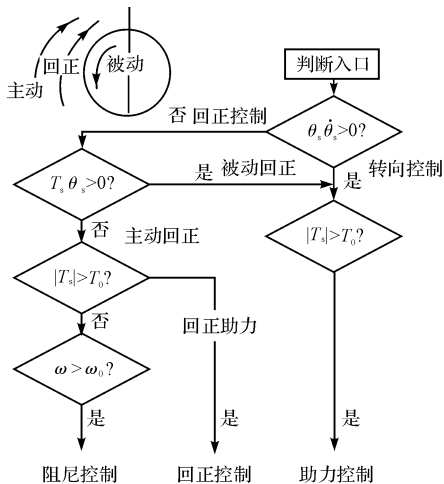


图 2 转向模式识别流程

当转向盘角度和角速度方向相同时,如果转矩传感器测得转矩  $T_s$  大于设定值  $T_0$ ,选择转向助力控制模式;当转向盘角度和角速度方向不同时,进入回正控制状态;在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,主动回正容易使转向盘扭矩的大小和方向突变,容易产生回正过量,这时选择阻尼控制,利用电机产生阻尼效应,避免转向盘强烈的抖动。

如 EPS 系统没有安装转向盘转角传感器,根据回正行程中的特征量来间接判断转向盘是否处于回正状态是研究的热点。文献[3] 根据转向盘转矩信号由非零向零的转变作为判断回正开始的条件,利用转矩变化率来进行回正状态判断;文献[4] 比较转向盘转矩电机作用在转向柱上的转矩及估计的折算到转向小齿轮上的轮胎回正力矩之和来判定车辆是否进入回正状态;文献[5] 利用电动机电压和电流估计电动机的转速,通过积分环节,估计转向盘转角。

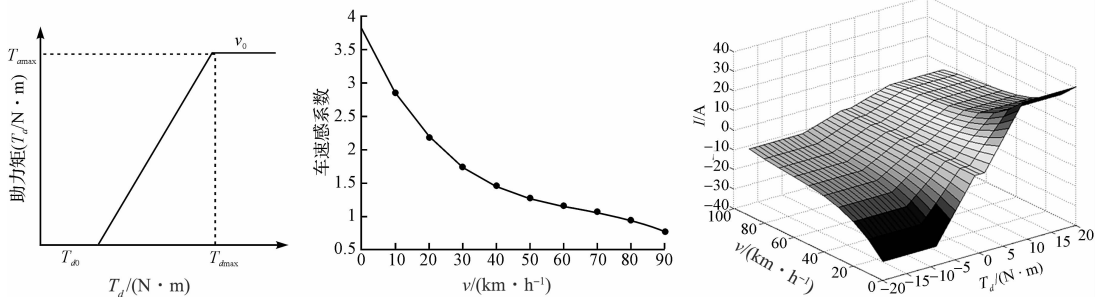


图 3 助力曲线及目标电流的形成

### 2.3 回正控制

车辆回正时既不能出现回正不足也不能出现回正超调,必须随着车速和转向盘转角的不同,施加不同的控制,以改善车辆的回正性能。目前,主要集中在主动回正控制算法的研究,以上文献中研究了转角  $\theta_s$  下的

### 2.2 基本助力

基本助力值常用特性曲线是指在一定车速下,转向盘操纵力矩与电动机输出力矩之间的变化关系。理想的助力特性应该能同时满足转向轻便性和路感的要求。确定助力特性是在某一阻力矩下确定助力矩与转向盘操纵力矩的分配关系。助力特性曲线的建立方法有基于固有路感计算、基于大量试验制表、基于控制理论调整控制参数<sup>[6]</sup>等。助力特性曲线是一族曲线的集合,它由方向盘力矩与车速共同决定。在一定车速下,根据数据的精确度,助力特性表现为直线型、折线型和曲线型。以较简单直线型助力特性曲线为例说明设计过程,首先固定某一低速为基准车速,仿真或测量车辆在 0.4 g 侧向加速度下行驶的阻力矩和理想转向盘力矩,确定出该基准车速下最大助力值,确定出该车速下的助力直线。然后,按同样方法确定出其他车速下的最大助力值,其他车速下的最大助力值与基准车速下的最大助力值的比值即为车速感应系数,通过拟合各车速下的感应系数可得出感应系数与车速的关系。最后,车速感应系数和基准车速下的助力直线相乘得到全车速范围的助力特性曲线。

在此过程中,需综合考虑汽车对原地转向或中低速转向时的转向轻便性、高速转向时的操纵稳定性以及路感的要求,确定出助力曲线上的特征点,这是实现助力性能的关键和研究的热点。主要特征点有:转向系统开始助力时的转向盘操纵力矩  $T_{\omega}$ 、转向盘最大操纵力矩  $T_{dmax}$ 、最大助力电流、车速感应系数等。将建立的助力曲线用 simulink 中的 2D-Lookup 模块制作查询表格。以上是针对控制助力电机的电流来控制助力转矩的大小,间接实现驾驶员对转向盘力矩特性的要求,以转向盘力矩为目标转矩的直接控制也是研究的热点。

助力曲线及目标电流的形成如图 3 所示。

保舵转矩  $T_s$  作为主动回正的特征参数确定需要控制的电流和作用时间的大小;以轮胎回正力矩为特征参数计算回正补偿电流,通过施加在基本助力电流上进行回正控制;采用模糊控制形成回正电流;文献[7] 采用恒值加力方式;文献[8] 以转向盘转角和转速为输

人采用 PID 算法计算回正电流。

### 2.4 阻尼控制

为改善汽车高速行驶时转向盘在中间位置的性能,使驾驶员在车速较高时保持转向手感,利用助力电机对转向系统施加阻尼控制。文献[9]让电动机绕组发生短路,电机将产生一个与转速成正比的反向力矩。文献[10]利用估计转速结合车速,设计了相应的阻尼特性。

### 2.5 电机控制

为了跟随根据上层控制策略计算出的目标电流,需要将电动机电枢电流作为反馈电流,与目标电流相比较,对其偏差利用(增量)PID、预测<sup>[11]</sup>、LQR<sup>[12]</sup>、模糊<sup>[13]</sup>、滑模<sup>[14-15]</sup>、H∞等控制算法来进行调节<sup>[16-17]</sup>,使助力控制算法有强的鲁棒性。调节后得到电动机的控制电压通过直流斩波技术(PWM)实现对电动机电枢电压U的控制,从而控制电动机的转矩输出。上面各控制算法所用参数值的设定是算法实现功能的关键,也是研究的热点<sup>[18-19]</sup>。在驱动电机的电路中采用双极性驱动可逆 PWM 系统,整体相当于一个延迟环节,传递函数为  $G_{PWM} = 1/(Ts + 1)$ ,其中:T—PWM 开关周期,一般取 1/20 000 s。随着无刷直流电机及同步电机在 EPS 的应用,对其控制策略的研究已成为热点<sup>[20-21]</sup>。

### 2.6 补偿控制

EPS 电机补偿控制包括电机惯量、阻尼和摩擦补偿控制,主要基于车速、电机角速度和角加速度信号确

定补偿控制电流,对 EPS 基本助力控制电流进行修正,降低 EPS 电机及减速机构的惯量、阻尼和摩擦对转向性能的影响。惯性补偿电流为  $I_j = K_j \ddot{\theta}$ ,其中: $K_j$ —惯性补偿系数;阻尼补偿电流为  $I_D = K_D \dot{\theta}$ ,其中: $K_D$ —阻尼补偿系数;摩擦补偿电流为  $I_F = K_F \text{sgn}(\theta_m)$  其中: $K_F$ —摩擦补偿电流幅值,上面的系数是车速的函数。补偿控制需要电动机角速度的信息,仍需建立电动机角速度估计器模型  $\dot{\theta}_m = (U - IR)/K_v$  来实现。

### 2.7 转向盘转矩信号的相位补偿

由于系统存在惯性、阻尼和摩擦,转矩传感器实际检测到的转矩和驾驶员实际操纵转矩之间有一定的相位延迟,特别是转向盘快速转动时,相位延迟更多。对转矩传感器检测到的转矩信号进行相位超前补偿处理,从而提高了控制系统的快速响应性。传递函数为:

$$G_c(s) = (1 + aT_s)/(1 + T_s) \quad (6)$$

式中:a—衰减系数,  $a > 1$ ;  $T_s$ —时间常数。

此外,还可建立路面冲击或侧向风作用下的补偿控制、基于车辆稳定性或路径跟踪性的方向盘转矩补偿控制等<sup>[22]</sup>。

## 3 建模与仿真

按照方程(1~5)、结合 EPS 动力学参数及助力特性曲线和电机 PID 控制参数可分别建立 EPS 机械系统模型及 PID 电机模型并改变参数和仿真模型状况。然后建立综合模型如图 4 所示。

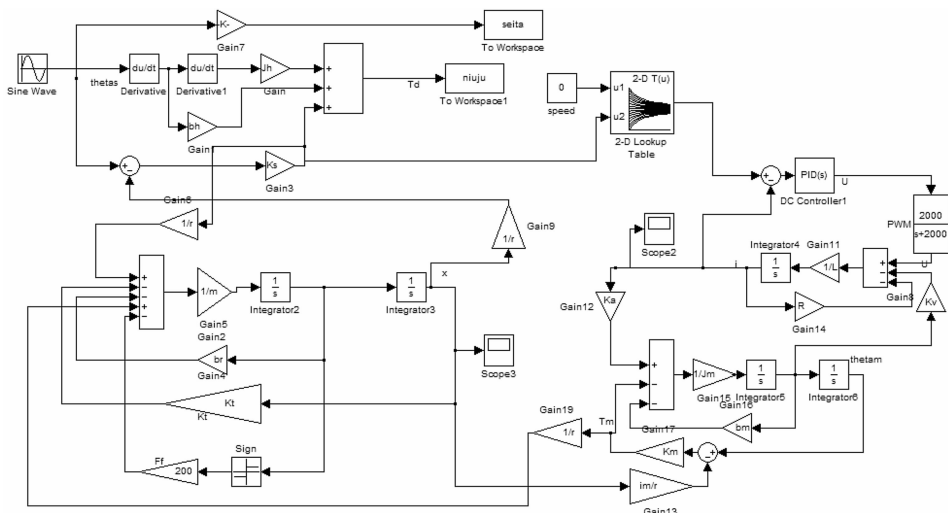


图 4 基本助力及 PID 电机控制 simulink 模型图

仿真设置如下:转向盘输入频率  $\pi/4$  且幅值为  $\pi$  的正弦角信号,分别进行了原地是否助力、车速 70 km/h 转向仿真(助力)。结果表明不加助力时,原地转向最沉重;加助力时,转向盘转矩大大减少,转向轻便性提高;另外,车速提高,转向盘上的转矩相应增加,说明车速提高后,驾驶员获得了较强的路感。

仿真结果如图 5 所示。

## 4 结束语

本研究寻求 EPS 系统在各方面的精确控制需考虑多方面因素,各控制之间是耦合的,甚至是矛盾的,认识下面几点有助于设计的思路 and 方向。

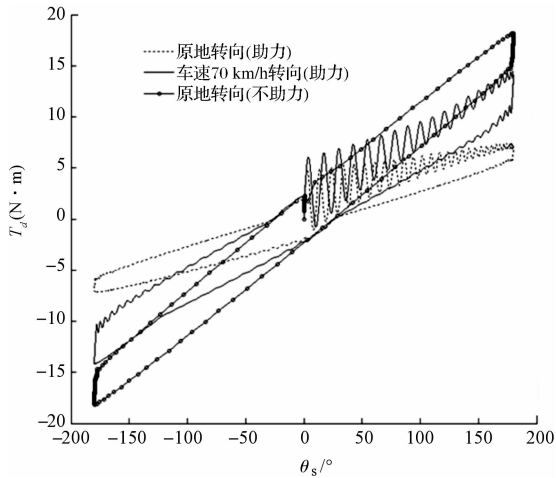


图5 转向轻便性及路感仿真

(1) EPS 动力学模型的复杂度、转向阻力矩的计算及仿真条件的设置是对其进行各控制项目开发的基础,针对不同的控制目标可相应选择。另外,理想转向盘转矩和路感及稳定性随不同驾驶员的感觉不同,如何确定它们的值是设计控制策略的难点。

(2) 随着对转向系统性能要求的提高,在基本不改变硬件的情况下,控制器软件控制的项目增多。模式判断方法、助力特性形成、回正及阻尼控制策略、噪声滤波、转向盘转角估计成为研究的热点。EPS 系统对路面冲击敏感、不能实现变传动比、主动转向控制难度较大,以及与其他系统的集成协调控制成为突破的难点。

(3) 在经典控制 PID 的基础上,智能控制理论在国内外研究各控制项目中被采纳,在应用这些智能控制时,对应的控制参数设定成为研究的重点和难点,在线调整控制参数或采用算法优化成为研究的方向。

## 参考文献 (References):

[1] 刘规划. 电动助力转向测试系统设计[J]. 机电工程技术, 2014, 43(9): 31-34.  
 [2] 季学武, 刘亚辉, 杨恺明. 乘用车电控转向系统的发展趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(3): 210.  
 [3] 景立群, 季学武. 电动助力转向系统的主动回正控制[J]. 汽车技术, 2008, 40(9): 11.  
 [4] 李绍松, 宗长富, 吴振昕. 电动助力转向主动回正控制方法[J]. 吉林大学学报, 2012, 42(6): 1355-1359.  
 [5] 赵林峰, 陈无畏, 秦明辉, 等. 基于转向轻便性及回正性能设计的 EPS 应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 181-184.

[6] 鹿鹏程. 汽车 EPS 控制算法研究与实现[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2012.  
 [7] 孟涛, 陈慧, 余卓平. 电动助力转向系统的回正与主动阻尼控制策略研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(12): 1125-1128.  
 [8] 黄正丹. 电动助力转向系统回正及阻尼控制策略研究与实现[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2011.  
 [9] 徐中明, 王吉全, 余烽. 基于 Simulink 的电动助力转向控制策略仿真[J]. 重庆理工大学学报, 2012, 26(3): 1-7.  
 [10] 盛朝强, 袁景明, 张瑞成. 基于转速辨识的 EPS 阻尼控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(8): 685-687.  
 [11] 宋咏. 基于 CarSim 的 EPS 系统建模及其控制仿真研究[D]. 柳州: 广西工学院电子信息与控制工程系, 2012.  
 [12] CHITU C, LACKNER J, HORN M. et al. Controller design for an electric power steering system based on LQR techniques[J]. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2013, 32(3): 763-775.  
 [13] LI Xin, ZHAO Xue-ping, CHEN Jie. Controller Design for Electric Power Steering System Using T-S Fuzzy Model Approach[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2009, 6(2): 198-203.  
 [14] 徐冠林, 石沛林, 唐绍丰. 电动助力转向系统的滑模变结构控制[J]. 山东理工大学学报, 2010, 24(3): 72.  
 [15] LIN F J, HUNG Y C, RUAN K C. An intelligent second-order sliding-mode control for an electric power steering system using a wavelet fuzzy neural network[J]. *Fuzzy Systems, IEEE Transaction on*, 2014, 22(6): 1598-1611.  
 [16] 冯引安. 汽车电动助力转向系统建模及控制算法研究[D]. 重庆: 重庆大学自动化学院, 2007.  
 [17] TOSHIO K, SHINJI T, MINEKAZU M, et al. Development of Electric Power Steering System with  $H_{\infty}$  Control[R]. Washington: SAE, 2000.  
 [18] HASSAN M. K, AZUBIR, N. A. M. NIZAM. H M, Iet al. Optimal Design of Electric Power Assisted Steering System Using GA-PID method[J]. *Procedia Engineering*, 2012(41): 614-621.  
 [19] 臧怀泉, 王媛媛. 基于遗传算法的电动助力转向系统鲁棒  $H_{\infty}$  控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(4): 544-548.  
 [20] 刘正奇, 林立, 朱虎, 等. 电动助力转向系统永磁同步电机控制建模与仿真[J]. 邵阳学院学报: 自然科学版, 2015, 12(1): 76-80.  
 [21] 姜伟, 孙军, 裘信国. 基于模糊 PI 控制的 PMSM 驱动控制系统[J]. 轻工机械, 2015, 33(5): 69-72.  
 [22] 孙涛, 徐正进, 郑松林, 等. 基于电动助力转向的车道保持性能研究与分析[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 2913-2919.

[编辑: 张豪]

## 本文引用格式:

王旭斌, 王生昌. 汽车电动助力转向系统控制现状分析[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1237-1241.

WANG Xu-bin, WANG Sheng-chang. Analysis of current control status of the electric power steering system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(10): 1237-1241.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>