

基于模糊滑模控制策略的电动助力转向系统的回正控制*

鹿鹏程^{*,1} 邓兆祥^{1,2} 任夏楠¹ 徐同强¹

(1. 重庆大学机械学院机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 400039)

摘要:参考整车二自由度模型,建立汽车在低速和中高速回正工况下的电动助力转向系统动力学模型。考虑到系统的复杂性、模型参数的不确定性和外界扰动,结合两种具有良好鲁棒性的控制策略(模糊控制策略和滑模控制策略)各自的优点,设计了用于改善电动助力转向系统回正特性的模糊滑模控制器。仿真结果表明,汽车低速和中高速时的回正特性都得到了改善,很好地解决了汽车回正过程中的回正不足和回正超调,验证了模糊滑模控制算法的有效性。

关键词:电动助力转向;滑模控制;模糊控制;模糊滑模控制

中图分类号:U463.4;TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1006-6055.2013.04.002

Return-to-center Control of Electric Power Steering System Based on Fuzzy Sliding Mode Control Method*

LU Pengcheng^{*,1} DENG Zhaoxiang^{1,2} REN Xianan¹ XU Tongqiang¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing 400039)

Abstract: Considering the 2 DOFs model of car, the EPS return-to-center dynamic model is established under the condition of high and low speed. For the complexity of the system, model parameter uncertainty and external disturbance, a fuzzy sliding mode controller is designed to improve the return-to-center's characteristic, combining the advantages of fuzzy control method and sliding mode control method. The simulation results show that the characteristic of return-to-center is improved whenever the speed is low or high, solving the overshoot and insufficient problem in the process of return-to-center. As a result, the validity of fuzzy sliding mode control method is proved.

Key words: electric power steering; sliding mode control; fuzzy mode control; fuzzy sliding mode control

1 引言

汽车转向后转向盘能自动回正,使汽车保持稳定的直线行驶状态,这是汽车转向系统的基本要求之一。汽车原地或低速行驶转向时,回正力矩较小,转向盘回不到中位,出现回正不足的现象;而汽车高速行驶转向时,回正力矩较大,转向盘在回正时容易越过中位,出现回正超调^[1]。驾驶员短时间内如果意识不到车辆不能及时回正,可能会不能及时操纵车辆,导致事故的发生。所以有必要在回正时进行回正控制,改善转向系统的动态特性以及驾驶员回正过程中的路感,进而改善汽车的操纵稳定性。

汽车转向系统是一个复杂的非线性系统,为研究问题方便,往往在建模时要对系统进行简化,简化后的模型存在着不精确性。同时,汽车的载荷变化、轮胎磨损、轮胎压力改变等均可能导致系统参数的变化;此外,汽车在行驶时受到路面不平度的激励,从而引发系统的不确定性干扰。考虑到模型参数的不确定性和外界扰动,有必要采用具有良好鲁棒性的控制策略。滑模变结构控制适用于线性或非线性系统,与普遍采用的PID控制算法相比^[2,3],不但对模型参数的不确定性和外界扰动具有高度的鲁棒性,而且具备方法简单,易于实现的优点。但是常规的滑模控制的缺点是当状态轨迹到达滑模面后,难于严格地沿着滑模面向着平衡点滑动,而是在滑模面两侧来回穿越,从而产生抖振。因此常把滑模控制和其它智能控制结合使用来削弱抖振。赵林峰和陈无

畏^[4]采用了传统的滑模控制策略进行回正控制,取得了不错的控制效果但是抖振现象很明显。M. Roopaei 和 M. Zolghadri Jahromi^[5-7]对于滑模控制、模糊控制各自的优缺点进行了分析,结合了两种控制算法的优点设计了模糊滑模控制器,验证了模糊滑模控制的可行性,为将模糊滑模控制策略应用到EPS回正系统中提供了依据。

针对上述问题,本文将滑模控制方法与模糊控制方法结合起来设计模糊滑模控制器,利用滑模控制良好的鲁棒性和响应迅速的特点,结合模糊控制策略来削弱抖振,以提高系统的回正性能,进而改善系统的操纵稳定性。

2 EPS 系统动力学模型

2.1 EPS 数学模型

如图1所示,电动助力转向系统由主要由转向盘、减速机构、齿轮齿条、电动机,以及传感器和ECU控制单元等组成。系统工作时,传感器将检测到的信号(有扭矩、转角和车速信号等)送入ECU控制单元,ECU控制单元经过分析计算得出合适的控制电流信号,并以此控制电机输出合适的助力扭矩,此扭矩通过转向传动系统作用到轮胎上,实现汽车的助力转向。动力学方程如下:

$$T_d - T_s = J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s \quad (1)$$

$$T_s = k_s (\theta_s - \theta_e) \quad (2)$$

$$J_e \ddot{\theta}_e + B_e \dot{\theta}_e = T_s + GT_a - T_p \quad (3)$$

$$m_r \ddot{x}_r + b_r \dot{x}_r = \frac{T_p}{r_p} - F_r \quad (4)$$

式中, θ_s 、 θ_e 分别为转向盘转角和输出轴转角; T_d 、 T_s 、 T_a 分别为转向盘输入转矩、转矩传感器测量转矩、电动机助力转矩; k_s 为转矩传感器扭杆的刚度; J_s 为转向盘和输入轴转动惯量;

* 重庆市科技攻关计划项目(CSTC,2009AB6021)资助

** E-mail: lpczdy2007@126.com

其中,模糊集 zo 和 nz 分别表示“零”和“非零”。模糊规则式表示当 s 为零时,模糊滑模控制器为等效控制 u_e ,当 s 为非零时,模糊滑模控制器为 $u_e + u_s$ 。

采用反模糊化方法,模糊控制器设计为:

$$u = \frac{\mu_{zo}u_e + \mu_{nz}(u_e + u_s)}{\mu_{zo} + \mu_{nz}} = u_e + \mu_{nz}u_s \tag{19}$$

$$\mu_{zo} + \mu_{nz} = 1 \tag{20}$$

当 $\mu_{nz} = 1$ 时, $u = u_e + u_s$,此时控制率为传统的等效滑模控制。当 $\mu_{nz} \neq 1$ 时,通过隶属函数 μ_{nz} 的变化实现抖振的消除。

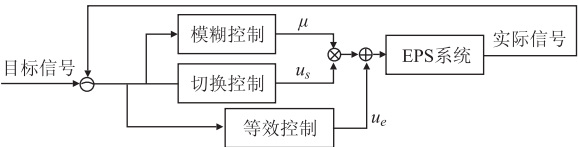


图2 模糊滑模控制系统结构图
Figure 2 Structure diagram of fuzzy sliding mode control

3.2 滑模控制模块的设计

滑模控制模块设计的两大重点是选择合理的切换函数 s 和控制器的合理设计。

3.2.1 等效滑模子模块的设计

回正控制系统定义为实际转角 θ_c 跟踪所需的目标转角 θ_d ,跟踪误差为 e ,则 $e = \theta_d - \theta_c$ 。选择切换函数为:

$$s = \dot{e} + ce \tag{21}$$

根据式(8)中的等效转向系统模型,可得:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_c &= \frac{T_d + GT_m - T_r - B\dot{\theta}_c}{J} \\ &= -\frac{B\dot{\theta}_c + T_r - T_d}{J} + \frac{GK_t I}{J} \\ &= f(\theta_c, t) + g(x, t)u(t) \end{aligned} \tag{22}$$

故切换函数的一阶导数 $\dot{s}$:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -\ddot{\theta}_c - c\dot{\theta}_c \\ &= -\left(-\frac{B\dot{\theta}_c + T_r - T_d}{J} + \frac{GK_t I}{J}\right) - c\dot{\theta}_c \\ &= -\frac{GK_t I}{J} + \left(\frac{B}{J} - c\right)\dot{\theta}_c + \frac{T_r - T_d}{J} \end{aligned} \tag{23}$$

根据等效控制法,等效控制 u_e 由 $\dot{s} = 0$ 得到:

$$u_e = I = \left(\frac{B}{GK_t} - c\frac{J}{GK_t}\right)\dot{\theta}_c + \frac{T_r - T_d}{GK_t} \tag{24}$$

3.2.2 切换控制子模块的设计和可达性验证

为了满足模糊到达条件 $ss \leq 0$,切换控制器设计为^[11]:

$$u_s = \frac{1}{g(x)}\eta \text{sign}(s) = \frac{J}{GK_t}\eta \text{sign}(s) \tag{25}$$

其中, $\eta \geq D, D$ 是系统扰动的绝对值的最大值。可达性证明:

$$\dot{s} = -\ddot{\theta}_c - c\dot{\theta}_c = \left(\frac{B}{J} - c\right)\dot{\theta}_c + \frac{T_r - T_d}{J} - \frac{GK_t u}{J} \tag{26}$$

而滑模控制器为:

$$u = u_e + u_s \tag{27}$$

联立以上各式,得:

$$ss' = s \cdot (-\eta \text{sign}(s)) = -\eta |s| \leq 0 \tag{28}$$

故满足可达条件。

3.3 模糊控制模块的设计

为简化控制复杂度,提高执行效率。采用 s 为唯一输入, μ 作为输出,把此 2 个变量模糊化,切换函数 s 范围从 -40 到 40,模糊论域上的模糊子集为 $T(s) = \{NB, NS, ZO, PS, PB\} = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$, μ 的范围从 -1 到 1,模糊论域上的模糊子集 $T(\mu) = \{NB, NS, ZO, PS, PB\} = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5\}$ 。其中, NB, NS, ZO, PS, PB 分别表示“负大”、“负小”、“零”、“正小”、“正大”。上述模糊控制器集合都取三角隶属函数。 s 和 μ 按照若 s 是正大,则 μ 为负大;若 s 是负大,则 μ 为正大等这样的规则来建立模糊关系。我们根据推理建立如下的模糊控制规则:

$$\begin{aligned} R_i: &\text{if } s \text{ is } S_i; \text{ then } u \text{ is } \mu_{6-i} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \\ &\text{从第 } i \text{ 个规则,则我们可以得到模糊关系为:} \\ R_i &= S_i \times \mu_{6-i} \end{aligned} \tag{29}$$

4 回正控制仿真实验

首先,驾驶员给转向盘施加转向力矩,使其产生一定的转向盘角度,然后突然将转向盘转矩减小为 0,模拟在转向系统无助力回正、常规滑模控制回正和模糊滑模回正控制的回正过程。

4.1 原地和低速回正过程仿真

原地和低速转向的回正过程如图 3,由于地面的摩擦力矩较大,无助力回正时无法快速回到中间位置;进行常规滑模回正控制后,转向盘比较迅速的回到了中间位置,消除了回正不足,但是回正后出现抖振现象。采用模糊滑模控制的回正准确快速无超调,并且回正之后不存在抖振现象。图 4 表明常规滑模控制的电流波动较大,而模糊滑模控制的电流变化相对平缓。

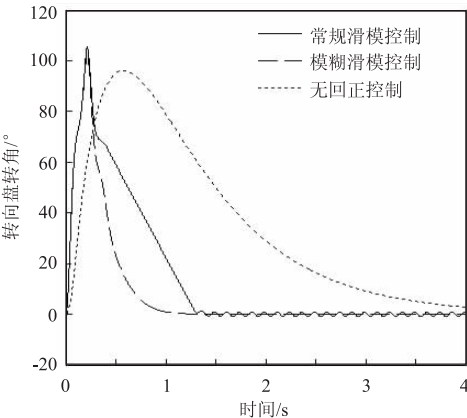


图3 低速回正过程转向盘转角
Figure 3 Steering wheel angle in the process of return-to-centre in low speed

4.2 中高速回正过程仿真

中高速时仿真结果如图 5,无回正控制的回正过程出现回正超调现象,难以回正;采用常规滑模回正控制后,回正准确迅速,抑制了回正超调现象,但是在方向盘回正后持续产生抖振。采用模糊滑模控制的回正准确迅速无超调,并且回正后无抖振。图 6 表明常规滑模控制的电流波动较大,而模

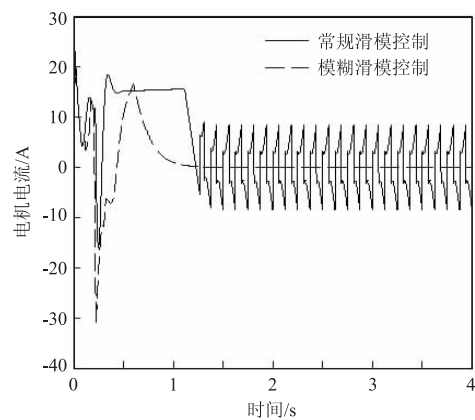


图 4 低速回正过程电机电流

Figure 4 Motor ' current in the process of return-to-center in low speed

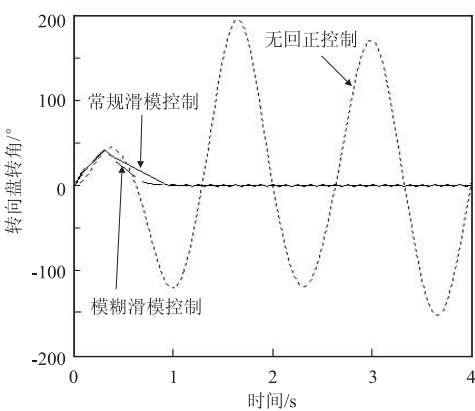


图 5 中高速回正过程转向盘转角

Figure 5 Steering wheel angle in the process of return-to-center in high and medium speed

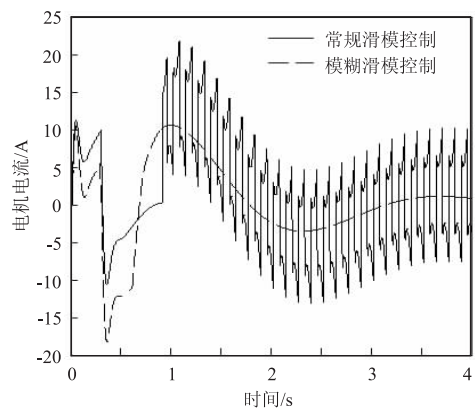


图 6 中高速回正过程电机电流

Figure 6 Motor ' current in the process of return-to-center in high and medium speed

糊滑模控制电流变化相对平缓。

仿真结果表明能够取得较好的控制效果,利用该方法设计的控制器,回正过程是迅速的、准确的,系统是稳定的。可以消除常规滑模控制中的抖振问题,并保证滑模控制的趋近运动的速度性和减小了跟踪误差,提高了控制精度。

5 结论

本文研究汽车电动助力转向系统的回正控制,分别分析了汽车在原地及低速、中高速两种回正工况下的回正力矩和回正阻力矩。基于模糊滑模控制策略设计了控制器。研究结果表明模糊滑模控制器保证了汽车在回正过程中回正迅速、准确、无抖振。解决了回正不足和回正超调的问题,提高了 EPS 系统的回正性能。

参考文献

[1]BURTON A W. Innovation drivers for electric power – assisted steering [J]. IEEE Control Systems Magazine,2003,23(6):30-39.

[2]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.

[3]赵万忠,施国标,林逸,等. 电动客车电动助力转向回正控制策略 [J]. 江苏大学学报,2011,32(1):28-31.

[4]赵林峰,陈无畏,秦炜华,等. 低附着路面条件的 EPS 控制策略 [J]. 机械工程,2011,47(2):109-114.

[5]ROOPAEI M,ZOLGHADRI M. Chattering-free fuzzy sliding mode control in MIMO uncertain systems [J]. Nonlinear Analysis,2009,71(5):4 430-4 437.

[6]NURKAN Y,YUKSEL H. Robust control of a spatial robot using fuzzy sliding modes [J]. Mathematical and Computer Modelling,2009,49(2):114-127.

[7]KIM S W,LEE J J. Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface [J]. Fuzzy Sets and Systems,1995,71(4):359-367.

[8]余志生. 汽车理论[M]. 4 版,北京:机械工业出版社,1998:144-146.

[9]赵林峰,陈无畏,刘罡. 电动助力转向系统全工况建模及实验验证 [J]. 农业机械学报,2009,40(10):1-7.

[10]CHEN J Y. Rule regulation of fuzzy sliding mode controller design: direct adaptive approach [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 2(120):159-168.

[11]刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005.