

基于模糊控制的 EPS 车辆操纵稳定性研究

袁传义, 贝绍秩, 刘成晔, 黄学勤

(江苏理工学院 汽车与交通工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要: 电动助力转向系统 (EPS) 通过电动机提供助力转矩, 协助驾驶员进行转向操纵; 在 EPS 动力学分析的基础上, 建立了 EPS 和汽车二自由度动力学模型, 设计了基于模糊控制理论的 EPS 控制系统及其控制策略, 在 Simulink 中搭建 EPS 及其模糊控制系统模型, 得到汽车车身侧偏角和横摆角速度仿真结果; 计算结果表明, 与无动力的机械式转向系统相比, 装备 EPS 的车辆车身侧偏角的峰值和标准差分别减少了 18.8% 和 19.1%, 具有更好的汽车操纵稳定性。

关键词: 电动机; 电动助力转向系统; 模糊控制; 操纵稳定性

Research on Vehicle Handling and Stability with EPS Based on Fuzzy Control

Yuan Chuanyi, Bei Shaoyi, Liu Chengye, Huang Xueqin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: The torque was provided by the electric motor of electric power steering system (EPS) to assist driver steering. EPS and vehicle two degrees of freedom dynamic model were established on the basis of kinetic analysis of EPS, EPS control system based on fuzzy control theory and its control strategy were designed. The EPS and its fuzzy control system model were established in simulink, vehicle body side slip angle and yaw rate graphics were obtained. The simulation analysis showed that, peak and standard deviation vehicle side slip angle were decreased by 18.8% and 19.1%, vehicle handling and stability were improved significantly by EPS compared with the mechanical steering systems.

Key words: electric motor; electric power steering system (EPS); fuzzy control; handling and stability

0 引言

电动助力转向系统 (Electric Power Steering System) 是在原有的机械转向系统的基础上, 主要根据车速传感器和转矩传感器检测的信号, 由电子控制单元 (ECU) 计算所需要的助力大小, 并通过驱动电路控制电动机, 使电动机产生相应大小和方向的辅助力矩^[1-3], 协助驾驶员进行转向操纵, 获得理想转向操纵手感。该系统主要由机械转向装置、转矩传感器、车速传感器、助力电动机、减速机构、电子控制单元 (ECU) 等构成, 如图 1 所示。

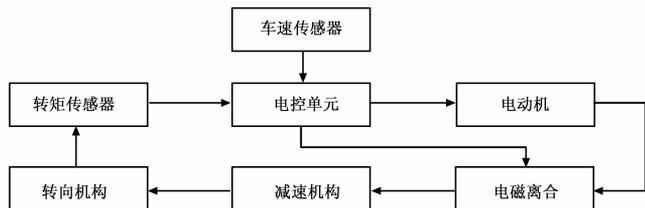


图 1 电动助力转向系统

EPS 不仅能使系统的低速性能和高速性能得到明显改善, 而且还能提高燃油经济性。国内外进行了大量的理论与试验研究^[4-7]。本文通过建立 EPS 和汽车二自由度动力学模型, 设计基于模糊控制理论的 EPS 控制系统及其控制策略。并在 Simu-

link 中搭建 EPS 及其模糊控制系统模型, 进行仿真计算分析, 验证模型的正确性和控制策略的有效性。

1 汽车二自由度模型

为便于掌握操纵稳定性的基本特性, 把整车的转向模型简化成二自由度的汽车转向模型进行研究, 此模型作了以下简化处理: 忽略转向系统的影响, 直接以前轮转角为输入; 忽略悬架作用, 认为汽车只作平行于地面的平面运动; 忽略空气动力的作用; 忽略左右车轮由于载荷变化而引起的轮胎特性的变化, 即认为左右转向角相等。简化后的二自由度汽车转向模型如图 2 所示^[8]。

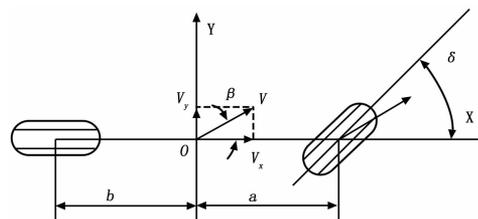


图 2 二自由度汽车转向模型

该模型的动力学方程为:

$$\begin{cases} (K_f + K_r)\beta + \frac{1}{V}(aK_f - bK_r)\omega_r - K_f\delta = mV(\dot{\beta} + \omega_r) \\ (aK_f - bK_r)\beta + \frac{1}{V}(a^2K_f + b^2K_r)\omega_r - aK_f\delta = J_z\dot{\omega}_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, m 为汽车质量; a 为前轮到质心的距离; b 为后轮到质心的距离; J_z 为汽车绕 z 轴的转动惯量; β 为车身的侧偏角; δ 为前轮转角; ω_r 为汽车横摆角速度; K_f 为前轮侧偏刚度; K_r 为后

收稿日期: 2014-01-11; 修回日期: 2014-02-21。

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK2012586); 江苏省六大人才高峰资助项目 (ZBZZ-023); 江苏省高校自然科学基金 (11KJB580001)。

作者简介: 袁传义 (1976-), 男, 安徽寿县人, 博士, 讲师, 主要从事车辆动态性能模拟与控制方向的研究。

轮侧偏刚度； V 为汽车行驶速度。

根据上面的动力学方程建立系统仿真模型的状态方程模块。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases}$$

其中状态变量为： $\mathbf{X} = [\beta \ \omega_r]$ ；

控制输入量为： $\mathbf{U} = [\delta]$ ；

输出量为： $\mathbf{Y} = [\beta \ \omega_r]$ 。

该模型主要有 1 个输入：前轮转角，系统输出主要包括车身的侧偏角和汽车横摆角速度。

2 EPS 的动力学模型

EPS 机械部分包括转向盘、转向轴、电动机、减速结构和齿轮齿条 4 个主要部分。根据系统的使用条件和研究对象，忽略一些次要因素，对 EPS 部件进行简化，在简化的基础上，根据牛顿运动定律建立各部分的力学模型，然后再根据各部件之间的相互约束关系，联立各模型，得到整个系统的模型。

2.1 转向盘和转向柱输入轴子模型

对转向盘和输入轴受力分析，这里考虑了转向盘的转动惯量，并且把输入轴的粘性阻尼考虑在内，可以得到如下运动方程：

$$J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s = T_h - T_{sen} \tag{2}$$

式中， J_s 为转向盘、输入轴转动惯量； B_s 为输入轴粘性阻尼系数； θ_s 为输入轴旋转角； T_h 为作用在转向盘上的转向转矩； T_{sen} 为扭杆反作用转矩。

由于转矩传感器是依靠扭杆的相对转动产生扭转变形，扭杆受到的转矩与扭杆的扭转角度成正比，即有

$$T_{sen} = K_s (\theta_s - \theta_e) \tag{3}$$

式中： K_s 为扭杆刚性系数； θ_e 为输出轴旋转角。

2.2 电动机模型

采用永磁式直流电动机，电动机的端电压 U 与电感 L 、电枢电阻 R 、反电动势常数 K_b 、转速 $\dot{\theta}_m$ 、电流 I 和时间 t 之间的关系如下：

$$U = L\dot{I} + RI + K_b \dot{\theta}_m \tag{4}$$

电动机产生的电磁转矩为：

$$T_m = K_a I \tag{5}$$

式中， K_a 为电动机的转矩系数。

对电动机机械部分受力分析，可以得到：

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = T_m - T_a \tag{6}$$

式中， J_m 为电动机和离合器的转动惯量； B_m 为电动机粘性阻尼系数； T_m 为电动机电磁转矩； T_a 为电动机输出转矩。

在实际的控制系统中，电动机助力转矩 T_a 可用下式表示：

$$T_a = K_m (\theta_m - G\theta_e) \tag{7}$$

K_m 为电动机和减速机构输出轴刚性系数。

2.3 输出轴子模型

对转向柱输出轴及电机输出轴进行动力学分析，得到下面的运动学方程：

$$J_e \ddot{\theta}_e + B_e \dot{\theta}_e = T_{sen} + G T_a - T_w \tag{8}$$

式中， J_e 为输出轴的转动惯量； B_e 为输出轴的阻尼系数； G 为蜗轮-蜗杆减速机构的减速比； T_w 为作用在输出轴上的反作用转矩。

2.4 齿条子模型

对齿条和小齿轮进行动力学建模，可以得到：

$$m_r \ddot{x}_r + b_r \dot{x}_r = \frac{T_w}{r_p} - F_{TR} \tag{9}$$

式中， m_r 为齿条及小齿轮的等效质量； b_r 为齿条的阻尼系数； x_r 为齿条的位移； r_n 为小齿轮半径； F_{TR} 为轮胎转向阻力及回正力矩等作用于齿条上的轴向力。

转向阻力 F_{TR} 主要受转向时车轮与地面的摩擦、回正力矩及转向系统中各种摩擦力和力矩的影响，同时它还车速、路况、转弯半径、风阻以及转向盘的转速等有关。对于常规助力控制过程，该模型的简化对控制策略的影响不大，可简化为

$$F_{TR} = k_r x_r + F_\delta \tag{10}$$

式中， k_r 为等效弹簧的弹性系数； F_δ 为路面的随机作用力。联立上面所建的动力学方程，可以得到

$$J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s + K_s \theta_s = T_h + K_s \frac{x_r}{r_p} \tag{11}$$

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + K_m \theta_m = T_m + GK_m \frac{x_r}{r_p} \tag{12}$$

$$M_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r + K_r x_r = \frac{GK_m}{r_p} \theta_m + \frac{K_s}{r_p} \theta_s - F_\delta \tag{13}$$

2.5 EPS 的状态空间方程

根据上面的动力学方程建立系统仿真模型的状态方程模块，其中状态变量为：

$$\mathbf{X} = [\theta_s \ \dot{\theta}_s \ x_r \ \dot{x}_r \ \theta_m \ \dot{\theta}_m]^T;$$

控制输入量为： $\mathbf{U} = [T_h \ T_m \ F_\delta]^T$ ；

输出量为： $\mathbf{Y} = [T_{sen} \ T_a \ \theta_s \ \dot{\theta}_s \ \theta_m \ x_r]$ 。

该模型主要有 3 个输入：转向盘转矩、电动机电磁转矩和路面的随机阻力，系统输出主要包括扭杆的反作用转矩、电动机助力转矩、输入轴的旋转角和输入轴的旋转角速度、电动机转角、齿条位移。

3 EPS 模糊控制系统设计

汽车动力转向系统具有高度的非线性、多自由度及时变的特点，而且控制过程还存在许多不确定的因素。模糊逻辑方法是处理不确定性、非线性和其它不适应问题的有力工具。因此设计 EPS 模糊控制方法，以改善控制器的性能，从而进一步改善电动助力转向的控制效果。

3.1 模糊控制的原理

简单地说，模糊控制原理就是把熟练技术工人或者技术人员的实践经验进行总结和形式化描述，用语言表达成一组定性的条件语句和精确的决策规则，然后利用模糊集合作为工具使其定量化，设计一个控制器，驱动执行机构对系统进行控制的过程，其原理框图如图 3 所示。

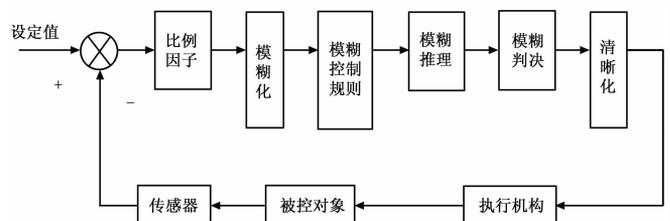


图 3 模糊控制原理框图

3.2 EPS 模糊控制原理框图

EPS 模糊控制系统原理框图如图 4 所示。

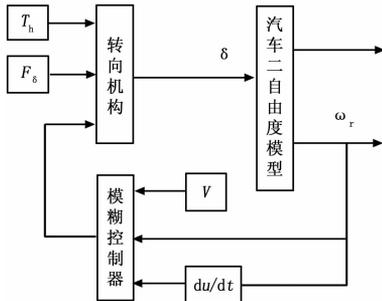


图 4 EPS 模糊控制原理框图

由图 4 中可以看出, 系统输入有转向盘的操纵转矩 T_h 、电动机助力转矩 T_m 和地面随机阻力 F_δ , 经过转向机构传递实现前轮转动一定角度 δ , 带动汽车模型实现转向, 最终输出汽车车身侧偏角 β 和横摆角速度 ω_r , 模糊控制器依据横摆角速度及其变化率和汽车行驶速度 V 的大小, 经过模糊控制规则运算, 得到当前工况所需助力转矩的方向和大小, 并提供给助力电机不同大小的电流值, 实现助力。

4 仿真结果分析

在 MATLAB6.5 的环境下建立 EPS、汽车二自由度转向模型及其模糊控制系统, 进行仿真计算及分析。仿真计算时, EPS 模型中的部分参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
整车质量 m	600(kg)
车身横摆转动惯量	488(km · m ²)
前轮到质心距离	0.958(m)
后轮到质心距离	1.377(m)
电枢电阻	0.168 Ω
电动机转动惯量	0.002(kg · m ²)
汽车行驶速度	20(m/s)

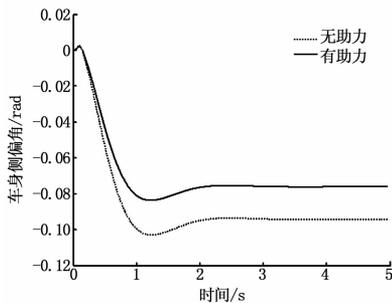


图 5 车身侧偏角

表 2 峰值的结果比较

控制方式	横摆角速度 ω_r (rad · s ⁻¹)	车身侧偏角 β (rad)
无助力	0.320 9	0.103 1
有助力	0.311 1	0.083 7

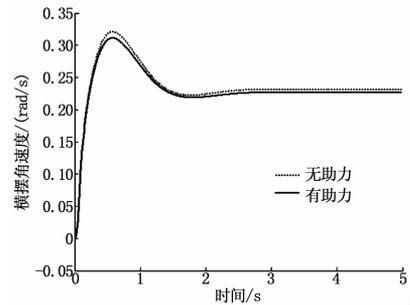


图 6 横摆角速度

表 3 标准差的结果比较

控制方式	横摆角速度 ω_r (rad · s ⁻¹)	车身侧偏角 β (rad)
无助力	0.028 7	0.019 4
有助力	0.027 1	0.015 7

从图 5、图 6、表 2 和表 3 可以看出, 与传统的机械式转向系统相比, 模糊控制下 (有助力) 车辆的横摆角速度响应更快, 并且其峰值和标准差分别减少了 3.1% 和 5.6%; 车身侧偏角的峰值和标准差分别减少了 18.8% 和 19.1%, 有效提高了车辆转向时的操纵稳定性和行车安全性。

5 结语

建立了 EPS 动力学模型和汽车二自由度动力学模型, 设计了 EPS 模糊控制控制系统。采用横摆角速度及其变化率和汽车行驶速度通过模糊控制器, 动态调整助力大小。仿真分析结果表明, 与传统的机械式转向系统相比, 经过模糊控制后的 EPS 车辆车身侧偏角和横摆角速度峰值和标准差均有一定程度减小, 较好提高了转向行驶时汽车操纵稳定性和的行车安全性能。并且模糊控制器设计简单方便, 控制效果好, 易于工程实现。

参考文献:

[1] 贝绍铁, 赵景波, 刘海妹. 含特殊转向工况的汽车 EPS 电动机控制策略 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (18): 5886-5895.
 [2] 杨其华. 汽车 EPS 性能试验与评价方法研究 [J]. 中国计量学院学报, 2005, 16 (2): 143-147.
 [3] 刘钢海, 杨其华, 陈洪飞. 模糊控制的 EPS 系统研究与仿真 [J]. 中国计量学院学报, 2007, 18 (1): 29-33.
 [4] 季学武, 马小平, 陈奎元. EPS 性能试验研究 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2004, 25 (2): 116-119.
 [5] 陈卫平, 陈无畏, 郁明. 汽车电动助力转向系统的模糊自调整控制研究 [J]. 合肥工业大学学报, 2005, 28 (5): 497-500.
 [6] Kim J H, Song J B. Control logic for an electric power steering system using assist motor [J]. Mechatronics, 2002, (12): 447-459.
 [7] 王廷宏, 陆文昌. 汽车电动助力转向系统控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (3): 330-335.
 [8] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.