

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801887

纯电动汽车电动助力转向模糊控制策略研究*

蔡彦兵 赵亮

(河南省驻马店财经学校 驻马店 463000)

摘要: 助力电机和减速装置是纯电动汽车电动助力转向系统(EPS)的核心部件,由于机构本身的惯量以及摩擦阻尼等因素影响 EPS 系统的转向性能,针对 EPS 系统响应慢、回正控制不灵敏的问题,提出一种基于模糊控制策略的控制方法来减小 EPS 系统的回正阻力,从而改善 EPS 系统的转向性能。其中,建立了 EPS 系统数学模型,对在实时行驶工况下纯电动汽车的 EPS 系统电机电流、电机转矩、方向盘转矩为控制对象,为了验证该控制策略的可行性,搭建了纯电动汽车 EPS 系统硬件在环实验环境,实验结果表明,所采用的模糊 PID 控制策略能很好的改善实时工况下的 EPS 系统转向性能。

关键词: 纯电动汽车;电动助力转向系统;回正阻力;实时行驶工况;模糊 PID 控制;硬件在环

中图分类号: TN703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on fuzzy PID control strategy of electric power steering in pure electric vehicle

Cai Yanbing Zhao Liang

(School of Finance and Economics, Zhumadian Secondary School, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Electric motor and reducer are the core components of electric power steering system of pure electric vehicles, due to the performance of institutional inertia and friction damping factors of the EPS system, the EPS system has the problems of slow response and returning not sensitively, proposing a control method of the fuzzy PID control strategy based on EPS system in order to reduce the back steering resistance, so as to improve the performance of EPS system. Among them, the establishment of the mathematical model of EPS system, the real-time driving conditions of pure electric vehicle EPS system of motor current, motor torque and wheel torque control with fuzzy PID control strategy, in order to verify the feasibility of the control strategy, building the pure electric vehicle EPS system hardware in the loop(HIL)test environment, Test results show that fuzzy PID control strategy adopted by the EPS. It also can improve the steering performance of EPS system under real-time driving condition.

Keywords: pure electric vehicle; electric power steering (EPS); back steering resistance; real-time driving conditions; fuzzy PID control; hardware in loop(HIL)

0 引言

新能源汽车产业的快速发展也推动着汽车车载部件以及相关技术的优化升级。随着人们对汽车性能要求的不断提高,机械转向系统和传统的液压助力转向系统已无法同时满足汽车低速行驶转向轻便性和高速转向路感的要求^[1]。在电子技术蓬勃发展的背景和人们轻便驾驶需求的双重驱动下,电动助力转向(electric power steering system, EPS)系统应运而生,解决了转向阻力大、操纵性能差的问题,与此同时,也提高了汽车的整车性能。

转向系统是汽车底盘系统中的重要组成部分,对汽车性能有着密切的影响关系^[2]。电动助力转向系统虽然在一定程度上缓解了汽车的转向阻力以及操纵稳定性问题,但是由于机械机构本身的惯量以及摩擦阻尼等因素,仍然影响 EPS 系统的转向性能。对此,国内外专家学者投入了大量的精力对 EPS 系统展开更为细致的研究,与此同时,也取得了很大的研究成果,其中 Mohanmadi 等^[3]对不同助力形式的 EPS 系统力矩特性进行分析,建立了 EPS 的系统模型,采用 PID 控制算法对不同的助力特性间的差异进行了仿真分析;Morita 等^[4]对 EPS 的研究是基于驾驶员主动转

收稿日期:2018-10-10

* 基金项目:国家自然科学基金(50874114)、河南省教育厅自然科学基金基础研究项目(2008A630064)资助

向时方向盘的转矩发生突变,采用转矩补偿控制对方向盘转矩突变进行修正控制;Kim 等^[5]针对汽车转向回正摩擦阻力大的问题,采用 Manual Steering System 控制策略,建立的摩擦模型对相关部件进行摩擦补偿控制,提高了汽车的回正稳定性。清华大学的季学武等^[6]针对汽车在高速行驶的工况下方向盘抖动和回正超调的问题,利用虚拟电阻来实现 EPS 系统阻尼控制,抑制信号的波动,提升了汽车助力转向的操纵性能;重庆大学的盛朝强等^[7]结合转速信号和阻尼信号,采用基于最小二乘法的转速在线参数辨识策略来抑制噪声以及外界的干扰,并通过仿真实验验证了其控制方法的可行性与稳定性。

本文通过建立二自由度的整车数学模型和 EPS 系统数学模型,结合方向盘力矩和助力电机电流信号,采用模糊控制策略来改善实时行驶工况下纯电动汽车电动助力转向的回正控制以及转向性能,搭建了纯电动汽车 EPS 系统硬件在环实验环境,硬件在环实验环境下验证的结果表明,采用模糊控制方法能很好地提高 EPS 系统的回正控制和汽车的转向和操纵性能。

1 动力学数学模型

EPS 通过对工况及相关参数的辨识判断出当前转向系统的转向状态,由电子控制单元(electronic control unit, ECU)完成辅助转向系统的助力、回正及阻尼控制,并且该系统能够根据车辆转向时的不同工况控制助力电机输出相应的转向辅助力矩^[8]。由于纯电动汽车电动助力转向系统是一个复杂的机电耦合系统,在实时行驶工况下通过对纯电动汽车 EPS 系统建立动力学数学模型,这样便于对整车操纵稳定性以及 EPS 控制特性进行深入分析,为控制策略的优化提供理论模型依据,建立的系统动力学数学模型包括二自由度的纯电动汽车整车数学模型以及 EPS 系统数学模型。

1.1 二自由度整车数学模型

在以整车做平面运动,不考虑汽车的位移(绕 Z 轴)、俯仰(绕 Y 轴)、侧倾(绕 X 轴),与此同时,忽略驾驶员主动转向过程中造成左右车轮载荷发生的变化且左右轮胎的特性是一致的理论环境下建立二自由度的整车数学模型,其中 O 点为简化后的汽车质心, OXY 是整车转向系统坐标系, Z 轴垂直于地面且向上为正。图 1 所示为建立的整车二自由度动力学模型结构^[9]。

由动力学定律可得整车运动数学方程:

$$\begin{cases} FY_1 \cos\delta + FY_2 = m(u\omega_r + \dot{v}) \\ c_l \cos\delta FY_1 \cos\delta - c_r FY_2 = I_z \dot{\omega}_r \end{cases} \quad (1)$$

则其运动微分方程为:

$$\begin{cases} (k_1 + k_2)\beta + \frac{1}{u}(c_l k_1 - c_r k_2)\omega_r - k_1 \delta = m(u\omega_r + \dot{v}) \\ (c_l k_1 - c_r k_2)\beta + \frac{1}{u}(c_l^2 + c_r k_2)\omega_r - c_l k_1 \delta = I_z \dot{\omega}_r \end{cases} \quad (2)$$

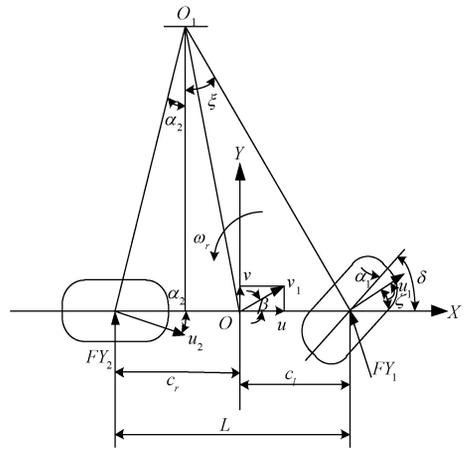


图 1 整车二自由度动力学模型

对上述运动微分方程进行拉普拉斯变换,可得:

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S + \frac{c_l^2 k_1 + c_r^2 k_2}{I_z u} & \frac{c_l k_1 - c_r k_2}{I_z} \\ 1 + \frac{c_l k_1 - c_r k_2}{mu u^2} & S + \frac{k_1 + k_2}{mu} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{c_l k_1}{I_z} \\ \frac{k_1}{mu} \end{bmatrix} \delta \quad (3)$$

1.2 EPS 系统数学模型

由文献[10-11]可知,在建立 EPS 系统数学模型过程中忽略非线性带来的影响,只考虑相关部件的惯量以及阻尼特性,其中, EPS 系统主要由方向盘、方向盘转角传感器、方向盘扭矩传感器、电控单元 ECU、助力电机、减速机构以及转向器等组成。EPS 系统的简化图如图 2 所示。

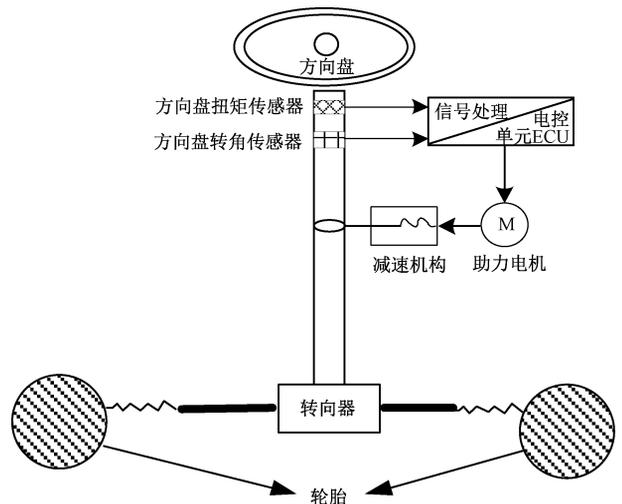


图 2 EPS 系统简化图

为了便于分析 EPS 系统部件的惯量和阻尼特性,选取了 EPS 系统中方向盘、输入输出轴、助力电机、转矩传感器和轮胎主要部件作为数学建模的对象,建立的数学模型如下所示。

$$\begin{cases} T_z = T_{lc} + T_{lr} + W \cdot D \cdot \theta_f \cdot \varphi \\ T_s = k_s(\theta_c - \theta_p) \\ T_d = T_s + B_c \dot{\theta}_c + J_c \ddot{\theta}_c \\ T_s - T_d = J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s \\ T_s + g_m T_m - T_p = J_e \ddot{\theta}_e + B_e \dot{\theta}_e \\ U = Ri + L \frac{dI}{dt} + k_t \omega_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_z, T_{lc}, T_{lr} 分别表示轮胎的回正力、汽车垂向力引起的回正力、前轴左右轮与路面形成的回正力; W, D, θ_f, φ 分别表示前轴载荷、主销内倾量、前轮转角、主销内倾角; $T_s, k_s, \theta_c, \theta_p$ 分别表示转矩传感器的转矩信号、扭杆刚度、方向盘转角、转向小齿轮转角; T_d, B_c, J_c 分别表示驾驶员手动力矩、方向盘阻尼、转动惯量; J_s, B_s, θ_s 分别表示方向盘与输入轴总转动惯量、输入轴阻尼系数、输出轴转角; g_m, T_m, T_p, J_e, B_e 分别表示减速机构减速比、电机助力转矩、输出轴转矩、输出轴转动惯量、输出轴摩擦系数; 助力电机的模型参数 $U, R, i, L, k_t, \omega_m$ 分别表示电机电枢电压、电枢电阻、电枢电流、电枢电感、电机转矩系数、电机角速度。

整车二自由度数学模型以及 EPS 系统数学模型参数如表 1 所示。

表 1 整车模型参数

| 参数 | 定义 | 参数 | 定义 |
|----------|---------|------------|--------|
| c_l | 前轮到质心距离 | ω_r | 横摆角速度 |
| c_r | 后轮到质心距离 | k_1 | 前轮侧偏刚度 |
| β | 质心侧偏角 | k_2 | 后轮侧偏刚度 |
| δ | 前轮转角 | I_z | 汽车转动惯量 |
| m | 整车质量 | u | 行驶速度 |

2 EPS 系统控制策略

EPS 系统是一个非线性、时变的系统,对于在实时行驶工况下的纯电动汽车 EPS 操纵不稳定以及回正控制的问题,采用模糊控制是基于低速高速时对电机电流、电机转矩和方向盘转矩进行惯量补偿、微分转矩补偿的一种补偿控制方法。在汽车操纵稳定性指标限值与评价方法(QC/T4800-1999)^[12]中明确规定了汽车 EPS 系统低速回正性能评价指标是残留横摆角速度,高速回正性能评价指标是横摆角速度超调量。模糊控制^[13]整合了自动控制技术、模糊技术与模糊系统理论,是一种基于模糊集合理论的新型控制方式,它利用模糊语言与模糊规则来描述和推导出受控系统的主要性能指标及动态特性,并能基于这些指标实时控制系统的运行。模糊控制器通常由规则库、清晰化接口、模糊化接口和模糊推理 4 部分构成,其整体结构如图 3 所示。

模糊化^[14]是指在控制器的输入论域、输出论域层面定义对应的语言变量,将明确的输入、输出值用模糊的语言。

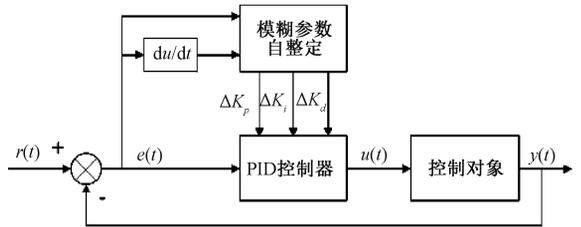


图 3 模糊控制整体结构

使用 3 个模糊控制器同时对 K_p, K_i, K_d 实时调整;模糊控制器有两个输入量,一是实际电流值和目标电流值两者的偏差 e ,二是偏差 e 的变化率 ec ;模糊输出量包括 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 。模糊控制规则很重要,是模糊控制器设计的核心,决定着模糊控制器的优劣。 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的物理论域分别为 $[-3, 3], [-0.06, 0.06], [-1, 1]$ 。将所有语言变量的论域均定义为 $[-6-5-4-3-2-1 0 1 2 3 4 5 6]$,在其论域上定义 5 个模糊子集{NB, NS, ZO, PS, PB},子集中从左到右排列的元素依次代表负大,负小,0,正小,正大。可求得量化因子分别为 $[0.3, 0.3]$,比例因子分别为 $[0.25, 0.02, 0.239]$ 。模糊规则如表 2 所示。

表 2 模糊规则表

| ΔK_p | ec | | | | |
|--------------|----|----|----|----|----|
| | NB | NS | ZO | PS | PB |
| NB | PB | PB | PS | PS | ZO |
| NS | PB | PS | PS | ZO | NS |
| e | ZO | PB | PS | ZO | NS |
| PS | PS | ZO | NS | NS | NB |
| PB | ZO | NB | NB | NB | NB |

| ΔK_i | ec | | | | |
|--------------|----|----|----|----|----|
| | NB | NS | ZO | PS | PB |
| NB | PB | NB | NS | NS | ZO |
| NS | NB | NS | NS | ZO | PS |
| e | ZO | NB | NS | ZO | PS |
| PS | NB | ZO | PS | PS | PB |
| PB | ZO | ZO | PS | PB | PB |

| ΔK_d | ec | | | | |
|--------------|----|----|----|----|----|
| | NB | NS | ZO | PS | PB |
| NB | PS | NB | NB | NB | PS |
| NS | ZO | NB | NB | NS | ZO |
| e | ZO | ZO | NS | NS | ZO |
| PS | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO |
| PB | PS | PS | PS | PS | PS |

由模糊控制理论以及制定的模糊规则可以明显的看到,对于 EPS 系统这一非线性、时变性强的系统,其被控对象,如电机电枢电流、电机转矩、方向盘转矩以及转角进行

分段微分模糊控制可以快速地减少系统的超调,尤其是在实时行驶工况的实验环境下,将外界带来的干扰分割阻隔,抑制系统的迟滞影响。

3 搭建硬件在环实验环境

验证采用的模糊控制策略能够快速提升 EPS 系统的回正控制响应以及操纵稳定性,搭建了基于 DS1103 控制板^[15]的硬件在环实验环境。其中,实验对象主体是 EPS 系统;电控单元 ECU 实现控制策略完成辅助转向系统的助力控制、回正控制以及阻尼控制;任意波形发生器模拟汽车的实时行驶工况;信号处理模块用于处理由方向盘转矩传感器以及角度传感器输出的电信号;信号控制箱是处理信号处理模块输出的信号以及 CAN 总线通信信号;上位机采用 ControlDesk 来处理输出的数据以及调节控制策略参数。EPS 系统模糊控制策略硬件在环实验结果如图 4~6 所示。

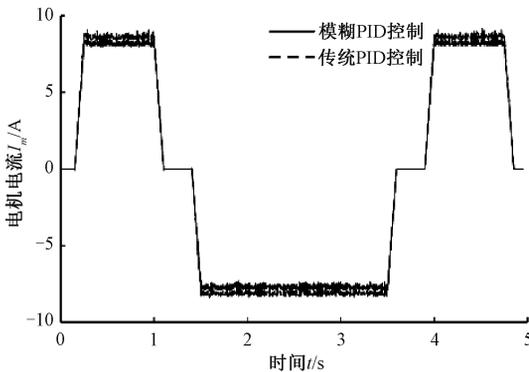


图 4 电机电流对比

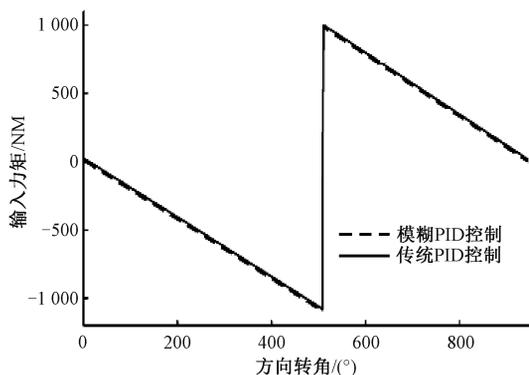


图 5 空载实验对比

由图 4 可知在汽车低速时,电机电流模糊 PID 控制开始起作用,通过对比传统 PID 控制的电机电流波形可以看出,在无模糊规则的传统 PID 控制时汽车低速行驶过程中电机电流波动较大,容易造成回正死区。

从图 5 空载实验过程中方向盘转矩波形可以看出,在辨识驾驶员手力上加的模糊控制能够有效地增加转矩,

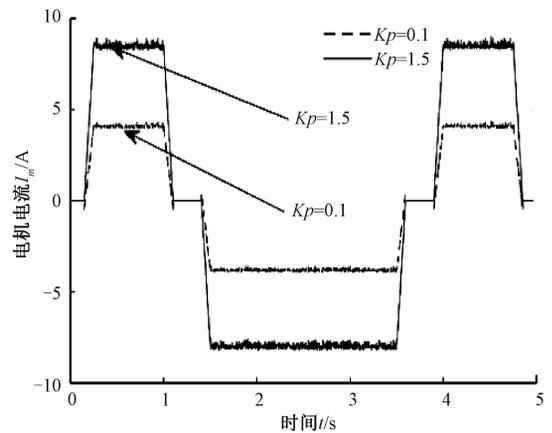


图 6 助力特性对比

减小回正阻力,提升方向盘操纵的轻便性。

由图 6 可以看出,采用模糊 PID 控制时不同的 K_p 值对电机电流的优化性能不同,随着方向盘转角的变化,减小 K_p 值电机电流波动较小, EPS 系统无超调现象,抑制了助力电机的惯量以及电流波动带来的静差。

4 结 论

本文通过建立纯电动汽车二自由度整车、EPS 系统数学模型,分别对影响 EPS 系统操纵稳定性的电机电流、电机转矩和方向盘转矩进行补偿控制,对这一非线性时变系统进行线性化,对部件惯量、阻尼以及外界干扰进行分段微分补偿控制,有效地抑制了系统的超调,为了进一步验证 EPS 系统补偿控制策略的有效性,搭建了实时行驶工况下的纯电动汽车 EPS 系统硬件在环实验环境,实验结果表明,采用的分段微分补偿控制方法有效的提升了 EPS 系统的转向性能与回正控制,与此同时,该控制方法也为以后更为复杂的行驶工况下提高 EPS 系统操纵稳定性提供了借鉴意义。

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.
- [2] 向丹.电动助力与主动转向组合系统的控制研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [3] MOHAMMADI H, KAZEMI R. Simulation of different types of electric power assisted steering to investigated applied torque positions effects[C]. SAE, 2002(1):585.
- [4] MORITA Y, YOKOI A, IWASAKI M, et al. Controller design method for electric power steering system with variable gear transmission system using decoupling control [C]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2010.
- [5] KIM J H, SONG J B. Control logic for an electric

- power steering system using assist motor [J]. *Mechatronics*, 2002, 12(3):447-459.
- [6] 何正义,季学武,张雪峰.永磁同步电机 EPS 的阻尼控制[J].*电力电子技术*,2008,42(5):66-68.
- [7] 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):685-688,700.
- [8] 祖春胜.电动助力转向系统补偿控制策略研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [9] YAMAZAKI I, KUSHIRO I, KUNIHIRO Y. Electronic power steering compensating control for influence of vehicle dynamics on steering torque[C]. SAE,2009.
- [10] SHIMIZU Y, ONIWA Y. Control for moment of motor Inertia on EPS [C]. SAE: *Steering & Suspension Technology and Tire & Wheel Technology*,2006.
- [11] ONIWA Y, SHIMIZU Y. Evaluation for steer feeling of inertia moment or viscosity of EPS motor and method for steer feeling creation [C]. *Proceeding of FISITA 2006 World Automotive Congress*, 2006:2006V245.
- [12] QC/T4800-1999:汽车操纵稳定性指标限值与评价方法[S].天津:全国汽车技术标准委员会,1999.
- [13] 周廷明,刘志辉,李梦奇,等.电动助力转向系统及其关键技术[J].*机床与液压*,2012,40(7):176-179,209.
- [14] 杨意品,曹兴举,巩建强.载货汽车 EPS 系统粒子群优化模糊控制仿真分析[J].*制造业自动化*,2016,38(1):92-96,111.
- [15] 曹勇,刘刚,李华德.基于滑模观测器的永磁直线同步伺服系统[J].*电气传动*,2008,38(1):44-47.

作者简介

蔡彦兵,硕士、讲师,主要研究方向为发动机电控系统、新能源汽车电子电控技术。

E-mail:caiyb1983@163.com