doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.008

耦合神经网络轮胎模型 EPS 自适应控制*

黄 晨 陈 龙 江浩斌 王志忠 夏 天 (江苏大学汽车与交通工程学院,镇江 212013)

摘要:建立了基于神经网络的轮胎模型。同时在 EPS 工况分类的基础上建立了工况推理准则,满足准确的判断要 求,进而根据 EPS 所处的不同工况更改模糊 PID 的模糊规则,实现了多种助力特性的自适应切换。建立了整车多 体动力学模型,进行了蛇形道路下的 SIMPACK/Matlab 联合仿真,并与基于 dSPACE 平台的实车试验进行对比分 析。结果表明,基于该模型设计的控制策略可以有效降低驾驶员的操纵转矩和提高车辆的回正性能。 关键词:轮胎 EPS 神经网络 自适应控制 中图分类号: U461.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)10-0047-05

Adaptive Control of EPS of Tyre Model Based on Neural Network

Huang Chen Chen Long Jiang Haobin Wang Zhizhong Xia Tian

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The tyre model based on neural network was built. Inference rules of working condition were established based on the classification of electric power steering (EPS) conditions, which could lead to a correct judgment. Furthermore, according to the different working conditions of EPS, the fuzzy rules of fuzzy PID were changed to achieve active switching of multi-assist characteristics. The whole multi-body dynamic vehicle model was built. The SIMPACK – Matlab co-simulation was carried out on the snakelike road, and then compared with the car test based on dSPACE. The simulation result showed that the control strategy based on the proposed model could effectively reduce the driver's operating torque and improve the returnability of vehicle.

Key words: Tyre Electric power steering Neural network Adaptive control

引言

电控助力转向系统(EPS)由电动机提供助力, 通过合适的综合控制方法,并设计控制器,方便地调 节系统助力特性,不仅与传统的液压助力转向相比 具有节能、安全、成本低和总装性好等优点,而且为 助力特性的设置提供了较高的自由度,使车辆在不 同车速下获得不同的静态助力特性,提高驾驶员转 向时的路感,以提高操纵稳定性。此外,它可大大改 善转向的响应,使车辆在经历弯道后引起的横向摆 动快速收敛^[1]。

但是,当车辆在高速转弯行驶时,侧偏角处于较

小的范围,轮胎侧向力呈线性变化,而在较大的侧向 加速度范围内,轮胎特性为非线性,侧向力呈非线性 变化,转向效果减弱^[2-3]。车辆在复杂运行工况和 大量不确定因素的影响下,行驶过程中的轮胎负荷、 路面附着情况、侧向力和切向力等都是变化的,需要 建立更加精确的模型才能满足控制的要求^[4]。同 时汽车高速时,转向盘出现回正超调;而低速时出现 回正不足。因此,为了使汽车转向系统拥有良好的 性能,有必要对电动助力转向系统进行分工况控 制^[5-8]。

经典动力学和经典控制理论已经不能解决上述问题。对于 EPS 系统而言,首先轮胎侧向弹性的研

收稿日期: 2011-11-14 修回日期: 2012-02-14

作者简介: 黄晨,博士生,主要从事车辆动态性能研究,E-mail: hcshumo@163.com

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50875112)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2010337)、江苏省高校自然科学基金资助项目 (09KJA580001)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093227110013、20103227120011)

究取得成效后,才能揭示出轮胎与转向系的关系,进 而准确地对工况实时判断决定助力的大小和方 向^[9]。本文通过神经网络建模来提高轮胎模型的 精度^[10-11],同时实时地判断 EPS 所处的不同工况 进而更改模糊 PID 的模糊规则,以期实现多种助力 特性的自适应切换,使 EPS 有良好的动、静态性能。

1 理论分析

1.1 轮胎模型

轮胎模型采用神经网络,包括输入层、隐含层和 输出层。输入层包含4个向量分别为侧偏角α、充 气气压p、垂直载荷F₂和车速u。隐含层由若干层 非线性传递函数组成。输出层为轮胎侧向力F_y单 个向量构成。

模型采用韩泰 165/65R13 型子午线轮胎,在上海聚德永开公司汽车轮胎道路旋转测试台上测得轮胎接地力数据(图1),通过对试验数据的拟合。最终得到网络结构为4-8-1。





Fig. 1 Lateral forces under twelve working conditions

该网络隐含层神经元的输入为

$$\theta_{j}(k) = \sum_{i=1}^{m} w_{ij} p_{i}(k) \quad (j = 1, 2, \dots, 8; m = 4)$$
(1)

式中
$$\theta_{j}(k)$$
——隐含层中第 j 个神经元的输入值
 $p_{i}(k)$ ——输入层输出

w_{ij}——输入层至隐含层的连接权重

隐含层的输入和输出之间的联系采用 Sigmoid 函数关系,即隐含层神经元的输出表达为

$$\xi_j(k) = f[\theta_j(k)] \quad (j = 1, 2, \dots, 8)$$
(2)
输出层神经元的输入函数为

式

输出层的输出与输入的关系为 Sigmoid 函数关系,表示为

$$I_l(k) = f[\zeta_l(k)] \quad (l=1) \tag{4}$$

式中 I₁——输出层神经元的输出

1.2 EPS 模糊规则设计

大量 EPS 研究证明,将模糊控制与 PID 控制相结合能够提高转向系统的性能及车辆动态性能,并且易于模块化,降低了系统的复杂性,提高工程应用的可靠性^[12-13]。

首先运用试凑法确定 PID 控制参数,然后运用 模糊推理,实现对 PID 参数的最佳调整。自适应模 糊 PID 控制器以误差 e 和误差 e_c 作为输入,满足不 同时刻 e 和 e_c 对参数自整定的要求。利用模糊控 制规则在线对 PID 参数进行修改,构成了自适应模 糊 PID 控制器,包括一个常规 PID 控制器和一个模 糊推理机。

PID 参数模糊自整定是找出 PID 3 个参数与 e和 e_c 之间的模糊关系,在运行中通过不断检测 e 和 e_c ,根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改,以 满足不同 e 和 e_c 对控制参数的不同要求,而使被控 对象有良好的动、静态性能。经过反复的试验总结, 不同工况的采取不同的模糊规则,由于篇幅限制仅 列取 k_p 参数不同工况下的模糊规则(表1~3)。

表 1 助力工况下 k_p 的模糊规则 Tab. 1 Fuzzy rule of k_n with assist conditions

| e | <i>e</i> _c | | | | | | |
|----|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----|----|
| | NB | NM | NS | ZO | \mathbf{PS} | PM | PB |
| NB | PB | PB | PM | РМ | PS | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | PM | \mathbf{PS} | PS | ZO | NS |
| NS | РМ | PM | PM | \mathbf{PS} | ZO | NS | NS |
| ZO | PM | PM | \mathbf{PS} | ZO | NS | NM | NM |
| PS | \mathbf{PS} | \mathbf{PS} | ZO | NS | NS | NM | NM |
| РМ | \mathbf{PS} | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

表 2 回正工况下 k_a 的模糊规则

Tab.2 Fuzzy rule of k_n with return conditions

| е | <i>e</i> _c | | | | | | |
|---------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|----|---------------|----|
| | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | PM | \mathbf{PS} | PS | ZO | NS |
| NS | PM | PM | PM | PM | PM | \mathbf{PS} | ZO |
| ZO | PM | PM | \mathbf{PS} | ZO | NS | NM | NM |
| \mathbf{PS} | \mathbf{PS} | \mathbf{PS} | PM | РМ | PS | ZO | NM |
| РМ | \mathbf{PS} | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

1.3 EPS 自适应模糊 PID 设计

由流程图可以看到(图2),系统通过整车传感

器来感知外部环境,将数据传给控制器。控制器首 先判断转向工况,给予相应指令,进一步驱动模糊 PID 控制器的运行,最终向助力电动机输出控制电 流(工况判断准则见表4、5)。

表 3 阻尼工况下 k_p 的模糊规则

Tab.3 Fuzzy rule of k_p with damp

| е | | | | | | | |
|----|----|---------------|---------------|----|---------------|----|----|
| | NB | NM | NS | ZO | \mathbf{PS} | РМ | PB |
| NB | PB | PB | РМ | РМ | \mathbf{PS} | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | \mathbf{PS} | ZO | NS | ZO | NS |
| NS | PM | РМ | РМ | PS | ZO | NS | NS |
| ZO | PM | РМ | \mathbf{PS} | ZO | NS | NM | NM |
| PS | PS | \mathbf{PS} | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM | PS | \mathbf{PS} | ZO | NS | NM | NM | NB |
| PB | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

表中 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别代表"负 大"、"负中"、"负小"、"零"、"正小"、"正中"、"正 大"。



Fig. 2 Flow chart of system

表 4 EPS 工况判断准则

Tab. 4 Judgment rules of EPS conditions

| 标识 | 数学表示 |
|-------|---|
| c_1 | $T_d < T_{d,0}$ |
| c_2 | \overline{c}_1 |
| c_3 | $u_{\rm vehicle} < u_{\rm vehicle,max}$ |
| c_4 | \overline{c}_{10} |
| c_5 | $\theta_{\rm h} \dot{\theta}_{\rm h} > 0$ |
| c_6 | \overline{c}_{12} |

表 5 工况推理准则

Tab. 5 Inference rules of working condition

| 标识 | 推理准则 | 工况环境 |
|----|---------------------------|------|
| 1 | $c_2 \land c_3 \land c_5$ | 助力工况 |
| 2 | $c_1 \wedge c_5$ | 阻尼工况 |
| 3 | $c_2 \wedge c_6$ | 回正工况 |

2 仿真

2.1 整车多刚体动力学模型

将前悬架模型、后悬架模型、转向系模型、轮胎 模型、车身模型等进行装配^[14],如图3所示。仿真 参数如表6所示。



Fig. 3 Whole vehicle model

表6 整车参数

Tab. 6Parameters of whole vehicle model

| 参数 | 数值 |
|----------------------------|-----------------------|
| 整车质量/kg | 900 |
| 最大总质量/kg | 1 330 |
| 簧下质量(前/后)/kg | 35/33 |
| 前轴质量(空/满)/kg | 540/640 |
| 轴距/mm | 2 335 |
| 前轴到质心距离/mm | 955 |
| 后轴到质心距离/mm | 1 380 |
| 前轮轮距/mm | 1 360 |
| 后轮轮距/mm | 1 355 |
| 车身尺寸(长×宽×高)/ | 2 400 1 575 1 670 |
| mm \times mm \times mm | 3 400 × 1 5/5 × 1 6/0 |

2.2 转向系统模型

所建转向系统模型为转向轴助力式齿轮齿条转 向器,简化后得到基本部件,包括转向盘、转向轴、小 齿轮、齿条、转向器壳体。建模时,首先测量和计算 得到系统各部件关键设计点坐标(表7);其次在各 个零件之间定义铰接和添加约束,其中转向盘、转向 柱与车身之间为圆柱铰,齿条与转向器壳体之间为 滑移铰,转向柱与齿条之间为齿轮约束,转向器壳体 固定在车身上,其拓扑结构如图4所示;最后,根据 模型关键点坐标和拓扑结构图,在 SIMPACK 中建立 多体动力学模型,同时,为了便于电动助力转向系统 提供助力,在转向轴上施加一个力矩作为助力矩,其 SIMPACK 模型如图5所示。

表7 转向系统关键点坐标

Tab.7 Key point coordinates of steering system

| 关键点 | 坐标(X, Y, Z)/mm |
|--------|--------------------|
| 转向盘中心点 | (220,320,730 |
| 转向轴上点 | (570,320,530) |
| 转向轴下点 | (720,320,220) |
| 齿轮齿条点 | (830,320,100) |
| 转向器壳点 | (830,220,100) |

2.3 联合仿真模型

利用 SIMPACK 软件中的 SIMAT 系统将整车多体动力学模型以非线性被控对象形式输出到





Fig. 5 SIMPACK model of steering system

Matlab/Simulink 环境中,并以 SIMPACK 联合仿真模 块子系统来表示,在 SIMAT 系统中定义联合仿真采 样周期和服务器进程 TCP 端口。所建立的联合仿 真系统 SIMAT 如图 6 所示。在 SIMPACK 中定义整 车模型需要的输出变量 Y(t)_Output_Vector 和输入 变量 U_Extern_o



图 6 联合仿真主程序模块 Fig. 6 Block diagram of co-simulation program

车辆动力学状态通过接口输送到控制器,控制 器经过逻辑运算发出控制指令,控制指令又通过接 口作用于车辆,从而使车辆在期望的动力学状态下 运行。利用闭环在线的仿真控制过程,调整控制算 法和参数直至达到满意精度为止。

采用能够代表汽车典型行驶工况的蛇行试验来 验证控制策略的效果。根据国家标准 GB/T6323. 1—94《汽车操纵稳定性试验方法一蛇行试验》,进 行仿真试验。仿真中,汽车行驶速度设为 40 km/h, 所测量的量为转向盘转角和转向盘转矩。图 7、8



Fig. 7 Comparison of steering wheel angle



分别为转角和转矩在有助力和无助力情况下的 对比。

由对比图 7、8 和表 8 中仿真结果可知,有助力 时转向盘转角平均峰值略有减小,相位基本一致;有 助力时转向盘转矩平均峰值下降了 53.46%,减小 了驾驶员的操纵力矩,提高了转向轻便性。

表 8 蛇形仿真结果 Tab. 8 Results of snakelike simulation

| 参数 | 无助力 | 有助力 |
|------------|-------|-------|
| 转角平均峰值/(°) | 69.70 | 59.78 |
| 转矩平均峰值/N·m | 5.90 | 2.89 |

2.4 硬件在环试验

采用基于德国 dSPACE 平台搭建系统的快速控 制原型进行硬件在环试验,并利用现有的试验设备 进行实车试验。首先搭建相关硬件部分的连接, EPS 系统的快速控制原型系统如图 9 所示。再将在 Matlab/Simulink 中设计的 EPS 控制系统程序通过 RTI/RTW 编译下载到 MicroAutoBox 中储存。 MicroAutoBox 接收采集转矩信号和车速信号,然后 根据算法计算控制量,并输出相应的控制信号给助 力电动机,从而实现对 EPS 系统助力的实时控制。 同时通过 ControlDesk 在计算机上实时观测和采集 各种所需要的数据,以便对控制系统进行监测和分 析。



为了验证模型仿真与实车试验结果的一致性。 实车试验采用蛇形试验工况,试验结果如图 10、11、 表 9 所示。由试验结果可以看出,车辆装有 EPS 时,转向盘转矩下降,助力效果明显。试验结果与仿



Fig. 11 Comparison of steering wheel torque

真结果吻合度较高。

表 9 蛇形试验结果 Tab. 9 Results of snakelike test

| 参数 | 无助力 | 有助力 |
|------------|-------|-------|
| 转角平均峰值/(°) | 69.17 | 61.67 |
| 转矩平均峰值/N·m | 5.96 | 3.11 |

3 结束语

通过神经网络建模提高了轮胎模型的精度,同时实时地判断 EPS 所处的不同工况进而调整模糊 PID 的模糊规则,实现了多种助力特性的自适应切换,从而使 EPS 有良好的动、静态性能。并采用 SIMPACK-Matlab 联合仿真和实车试验对比,结果表明,基于该模型设计的控制策略满足了车辆转向具 有操纵轻便性和良好的回正性能。

参考文献

- 1 李强,何仁. 基于 PI 电流环电动助力转向系统的鲁棒 H₂ 控制[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(2):138~142.
- Li Qiang , He Ren. Robust H_{x} control of electric power steering system based on PI current loop[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(2):138 ~ 142. (in Chinese)
- 2 施国标,申荣卫,林逸.电动助力转向系统的建模与仿真技术[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(1):31~36. Shi Guobiao, Shen Rongwei, Lin Yi. Modeling and simulation of electric power steering system[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2007,37(1):31~36. (in Chinese)
- 3 王其东,杨孝剑,陈无畏,等. 电动助力转向系统的建模及控制[J]. 农业机械学报,2004,35(5):1~4. Wang Qidong, Yang Xiaojian, Chen Wuwei, et al. Modeling and simulation of electric power steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(5):1~4. (in Chinese)
- 4 Dursun Aydin. A comparative study of neural networks and non-parametric regression models for trend and seasonal time series [J]. Trends in Applied Sciences Research, 2009, 4(3):126 ~ 137.
- 5 赵林峰,陈无畏,刘罡.电动助力转向系统全工况建模及试验验证[J].农业机械学报,2009,40(10):1~7. Zhao Linfeng, Chen Wuwei, Liu Gang. Modeling and verifying of EPS at all operating conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(10):1~7. (in Chinese)
- 6 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 应用研究[J]. 机械工程学报,2009,45(6):181~187.
 Zhao Linfeng, Chen Wuwei, Qin Minghui, et al. Study of electric power steering application based on return ability and handiness
 [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2009,45(6):181~187. (in Chinese)
- 7 Hassan M K, Aziah N, Nizam H M I, et al. A comparative study of power consumption of electric power steering system [C] // 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2012: 178 ~ 182.
- 8 Yang Shengbing, Guo Xuexun, Bo Yang, et al. Return-to-center control of electric power steering [C] // The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, ICEMI' 2009:3-435~3-439.
- 9 张洪欣. 汽车系统动力学[M]. 上海:同济大学出版社, 1997: 2~10.
- 10 黄晨,汪若尘. 多智能神经网络轮胎模型仿真研究[J]. 计算机仿真,2009,26(2):289~292.
- 11 陈龙,黄晨,江浩斌,等. 基于智能体一神经网络的轮胎侧偏特性[J]. 机械工程学报,2012,48(2):153~158.
- Chen Long, Huang Chen, Jiang Haobin, et al. Tire lateral-slip characteristics based on agent-neural net[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2):153 ~ 158. (in Chinese)
- 12 Zhang H, Ren J, Zhong Y R. Study on assisted performance of electric power steering based on fuzzy control [C] // IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, 2007:1031~1034.
- 13 吕威,郭孔辉,张建伟. 电动助力转向综合前馈和模糊 PID 反馈的电流控制算法[J]. 农业机械学报,2010,41(8):10~15.
 Lü Wei, Guo Konghui, Zhang Jianwei. Feed-forward integrated with fuzzy PID feedback current control algorithm in electric power steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):10~15. (in Chinese)
- 14 陈龙,黄晨,江浩斌,等. 基于悬架效用函数的车身控制[J]. 农业机械学报,2011,42(8):15~19.
 Chen Long, Huang Chen, Jiang Haobin, et al. Body posture control based on suspension utility function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):15~19. (in Chinese)