

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.012

分布式驱动电动汽车 EPS 设计与联合仿真研究*

崔纪明, 赵景波*, 王响, 翟羽

(江苏理工学院 汽车与交通工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要:针对汽车转向的轻便性和稳定性问题,对分布式驱动电动汽车 EPS 进行了研究。设计了助力电机电流的模糊 PID 控制算法,建立了以 Adams/Car 为平台的分布式驱动电动汽车模型,提出了一种基于 Car 和 Matlab/Simulink 的机电一体化联合仿真方法,利用联合仿真模型的闭环控制回路对分布式驱动电动汽车的转向轻便性进行了双移线工况仿真,对操纵稳定性进行了转向盘角阶跃输入和低速转向回正仿真试验,分析了转向盘力矩、横摆角速度和车辆侧向加速度响应曲线。仿真研究结果表明:EPS 控制下转向轻便性和操纵稳定性分别提高 35.5% 和 13.9%,与 PID 控制相比,所设计的模糊 PID 控制提高了汽车转向综合性能。

关键词:分布式驱动电动汽车;电动助力转向;联合仿真

中图分类号:TH39;U469.72

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)05-0507-05

Co-simulation and design of distributed driving electric vehicle EPS

CUI Ji-ming, ZHAO Jing-bo, WANG Xiang, ZHAI Yu

(School of Automation and Transportation Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Aiming at the portability and stability of car steering, study on electric power steering (EPS) for distributed driving electric vehicles were carried out, the fuzzy PID control algorithm assisting the motor current was designed, the distributed driving electric vehicle model by Adams/car was established, a mechatronic co-simulation method based on car and Simulink was presented, the portability of steering lane change, the stability of angle step input and low speed self-aligning were tested under the closed-control loop of co-simulation model, the response curve of steering wheel torque, yaw rate and vehicle lateral acceleration were analyzed. The experimental results show that the portability and vehicle handling stability are increased by 35.5% and 13.9% respectively under EPS, compared with the PID control, the designed fuzzy PID control improves the overall steering performance of the car.

Key words: distributed driving electric vehicle; electric power steering(EPS); co-simulation

0 引 言

分布式驱动电动汽车将驱动电机安装在驱动轮内或驱动轮附近,具有结构紧凑、动力传动链短、传动高效等突出优点。其中分布式电机(轮毂电机)是其重要部件,针对汽车转速和转矩的需求,响应速度快,可

控性强^[1-2]。

文献[3]研究了线控四轮独立驱动/制动/转向轮毂电动汽车的底盘集成控制方法;为改善转向轻便性和提高路感,文献[4]研究了基于差动驱动的助力转向技术。纵观目前国内外对分布式驱动电动汽车的研究,尤其是与 EPS 系统结合的探索,都处于起步阶段^[5-8]。在实现四轮独立电驱动与 EPS 的良好匹配并

收稿日期:2017-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61503163);江苏理工学院研究生创新工程项目(20820111619)

作者简介:崔纪明(1991-),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事车辆智能控制与检测方面的研究。E-mail:cui_jiming@163.com

通信联系人:赵景波,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:66822871@qq.com

协调工作上还有待进一步探索。

本研究将立足汽车横向运动控制研究,以分布式驱动电动汽车为全新载体,研究 EPS 控制对整车转向轻便和操纵稳定性的影响,寻找分布式驱动电动汽车与 EPS 的连接点,借助先进计算机仿真软件 Adams/car 和 Matlab/Simulink,完成对整车 EPS 的机电一体化联合仿真。

1 C-EPS 组成与工作原理

以转向轴式电动助力转向系统为研究对象。电动助力转向系统一般由机械转向机构、电子控制单元(electronic control unit, ECU)、转向盘转矩传感器、车速传感器、助力电机和减速与离合器机构等组成^[9]。

C-EPS 组成如图 1 所示。

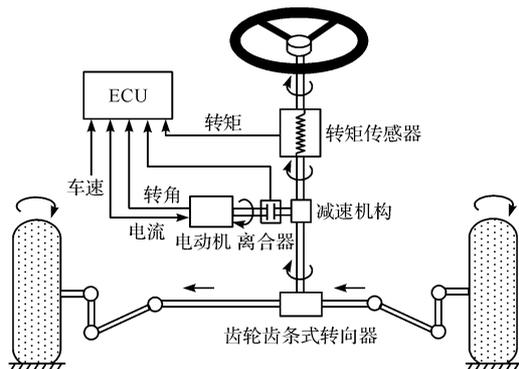


图 1 C-EPS 机构图

C-EPS 工作原理:

转矩传感器将检测到的转向盘输入信号传递至 ECU,电子控制单元结合车速、转矩及助力电机转角信号,通过控制算法计算转向助力电机电流并激励电机,经离合和减速机构作用于齿轮齿条。

ECU 决定助力电动机的旋转方向和助力电流的大小,控制电动机进行转向助力。它可以容易地实现不同的助力效果,助力电流随着车速变化而变化,调节转向“轻”与“灵”的矛盾,使汽车在低速行驶转向轻便灵活,高速行驶稳定可靠,高速时系统减小助力电机助力,使转向变沉,满足高速转向稳定的要求。

2 EPS 建模与助力特性曲线设计

2.1 EPS 动力学模型

研究 EPS 系统性能或对其进行控制算法设计,首

要是分析建立 EPS 动力学模型。传统控制方法和现代控制理论大多需要对被控对象建立模型,为探究系统的稳定性提供数学基础。

对 EPS 系统作力学分析与建模,并简化相关非线性系统,由牛顿力学和理论力学及电力电子相关理论,各部件动力学模型建立如下。

转向轴动力学方程为:

$$J_s \ddot{\theta}_{sw} + C_s \dot{\theta}_{sw} + K_s \theta_{sw} = T_{sw} + K_s \frac{\chi}{R_p} \quad (1)$$

式中: J_s —转向轴转动惯量; θ_{sw} —转向盘转角; C_s —转向轴阻尼系数; K_s —转向轴刚度系数; T_{sw} —转向盘力矩; χ —位移; R_p —小齿轮的有效半径。

齿轮齿条的动力学模型为:

$$M_r \ddot{\chi} = \frac{K_s}{R_p} \left(\theta_{sw} - \frac{\chi}{R_p} \right) + \frac{T_a}{R_p} - C_r \dot{\chi} - F_r \quad (2)$$

式中: M_r —等效质量; T_a —力矩; C_r —等效阻尼; F_r —在齿条上的等效转向阻力; $(K_s/R_p)(\theta_{sw} - \chi/R_p)$ —转向轴作用于齿条上的力; T_a/R_p —助力电机经过减速机构作用在齿条上的助力。

上式可以简化为:

$$F_r = K_r \chi + f_r \quad (3)$$

式中: K_r —等效刚度; f_r —路面对轮胎产生的随机扰动。

式(2,3) 经合并与化简,可得到:

$$M_r \ddot{\chi} + C_r \dot{\chi} + K_r \chi = \frac{K_s}{R_p} \left(\theta_{sw} - \frac{\chi}{R_p} \right) + \frac{T_a}{R_p} + f_r \quad (4)$$

转矩传感器动力学方程为:

$$T_s = K_s \left(\theta_{sw} - \frac{\chi}{R_p} \right) \quad (5)$$

式中: T_s —传感器输入扭矩。

助力电机助力特性方程为:

$$I = K_a T_s \quad (6)$$

式中: I —电枢电流; K_a —助力增益,定义转向“路感”,合理选择 K_a 可得相应的路感,满足驾驶性能。

根据基尔霍夫电压定律,电机输入电压须满足:

$$V_m = R_m I + L_m \dot{I} + V_b \quad (7)$$

式中: V_m —输入电压; R_m —电机电枢绕组电阻; L_m —电机电感系数; V_b —反向感应电压。

其中反向感应电压为:

$$V_b = K_b \omega_m \quad (8)$$

式中: K_b —反向感应系数; ω_m —转速。

$$T_m = K_m I \quad (9)$$

式中: T_m —电机输出力矩; K_m —电机扭矩常数。

助力电机提供的助力力矩为:

$$T_a = T_m N \tag{10}$$

式中: N — 减速比。

2.2 直线型助力特性曲线模型

直线型助力特性曲线的函数表达式如下:

$$I = \begin{cases} 0 & 0 \leq T_d < T_{d0} \\ K_v(T_d - T_{d0}) & T_{d0} \leq T_d < T_{dmax} \\ I_{max} & T_d \geq T_{dmax} \end{cases} \tag{11}$$

式中: I — 电机的目标电流; I_{max} — 电机最大工作电流; T_d — 转向盘输入力矩; K_v — 特性曲线的斜率,也称为助力梯度,是车速的函数,因而又可称为车速感应系数,随着车速的增加而减小; T_{d0} — 系统开始助力时转向盘输入力矩; T_{dmax} — 系统提供最大助力时转向盘的输入力矩。

根据式(11),运用 Matlab/Simulink 建立直线型助力特性曲线模型,并结合公式(1~10)建立本文提出的分布式驱动电动汽车 EPS 的电动助力转向特性模型,在每一个特定的车速上都有一个转向特性,是不同车速下转向助力特性曲线束的组合,且给出了助力电机输出电流与转向力矩与和车速间的关系。

3 模型设计

3.1 整车模型设计

Adams/car 是面向对象基于模板进行建模的,子系统之间具有内在的拓扑结构,建模效率高。本文在 Adams/car 环境下建立了麦弗逊前悬架、多连杆式独立后悬架、齿轮齿条转向系、车轮和车身,并装配各子系统组成整车模型。

整车模型如图 2 所示。



图 2 整车模型

3.2 控制模型设计

文献[10-11]分别采用神经网络控制和 LQG

控制,研究了电动助力转向的电机电流控制。本文采用了模糊 PID 控制,确定输入变量分别是目标助力电流和助力电机实际检测电流的偏差 e 及其变化率 ec ,依据建立的规则库,模糊化后再解模糊得到变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 模糊输出接口对上述模糊变化量进行模糊判决,解模糊得到精确量再作用于 PID 控制,这样可以在线改变 PID 控制器的参数。

本文设计的 EPS 助力控制策略如图 3 所示。

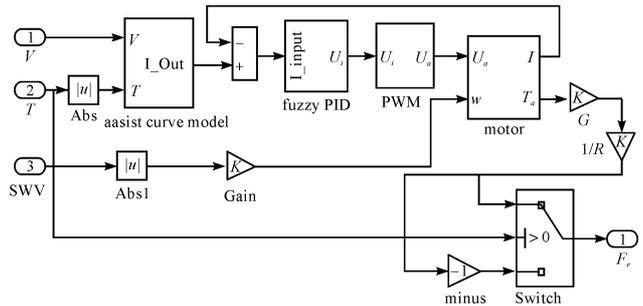


图 3 EPS 控制策略系统 Simulink 模型

其控制原理为:

控制器在行车过程中连续接收车速信号、转向盘力矩和转向盘速度信号,根据前文设计的助力特性曲线,计算出助力电机的目标电流,检测电机的实际工作电流,并与目标电流进行对比求两者偏差,经过模糊 PID 调节后得到电机的控制电压,再通过脉宽调制技术对电动机的电枢电流进行控制,最终实现对电机助力扭矩的输出控制。

4 联合仿真研究

4.1 模型验证

本研究将整车的 Adams_sub 模块嵌入到 EPS 控制系统,系统从整车模型获取车速、转向盘转速、转向盘转矩信号输入 EPS 控制系统,又将 EPS 控制系统的转向齿条助力信号反馈输入至整车模型。

闭环控制回路如图 4 所示。

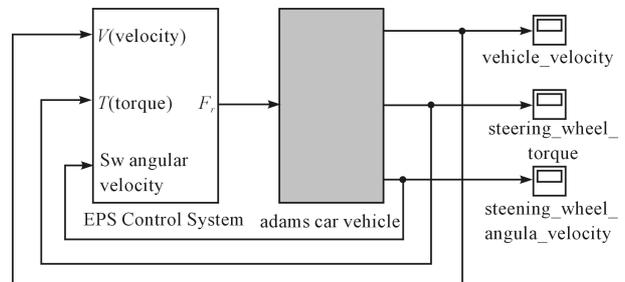


图 4 整车系统与 EPS 系统联合仿真模型

本研究对不加装 EPS 系统和加装 EPS 系统的模型进行双移线工况仿真,双移线仿真可量化车辆的随动性和转向轻便性。

转向盘力矩如图 5 所示。

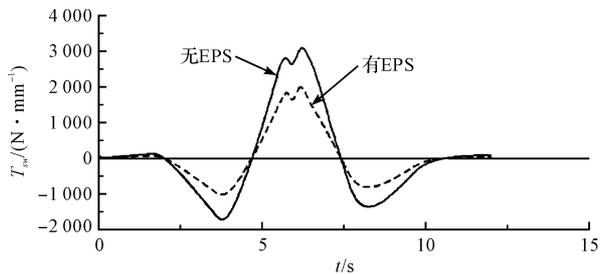


图 5 转向盘力矩

横摆角速度如图 6 所示。

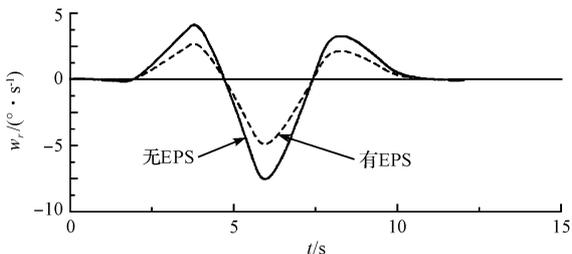


图 6 横摆角速度

由图可知:

加入 EPS 控制后,转向盘峰值力矩降低 35.5%,转向轻便明显提高,横摆角速度峰值下降 34.7%,表明车辆的操纵稳定性更好,同时验证联合仿真模型是有效的。

4.2 转向瞬态响应仿真

设置仿真条件:汽车以 80km/h 直线行驶,在第 3 s 时给予转向盘 +80°(以右转为正)阶跃角度,阶跃输入下车速保持恒定,记录开始至新一次稳态转向全过程。选取反映汽车操纵稳定性的横摆角速度与侧向加速度作为指标,分析系统在无 EPS 控制、PID 控制和模糊 PID 控制下的响应。

横摆角速度响应如图 7 所示。

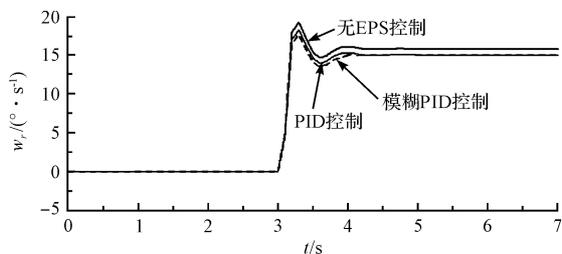


图 7 角阶跃输入下的横摆角速度响应

侧向加速度响应如图 8 所示。

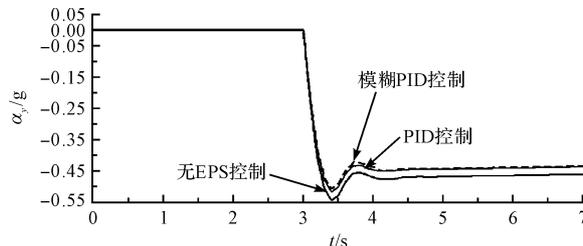


图 8 角阶跃输入下的侧向加速度响应

由图可知:EPS 系统控制使得横摆角速度和侧向加速度峰值降低,且所设计的模糊 PID 控制器相比 PID 控制效果有所提高,表明车辆的操纵稳定性表现更佳。对比无 EPS 控制,模糊 PID 控制的转向盘角阶跃输入下的横摆角速度峰值和侧向加速度峰值分别下降 7.89% 和 8%。

4.3 低速转向回正仿真

汽车回正性是操纵稳定性的一个重要评价内容,为进行低速回正仿真试验,设置仿真条件:汽车以 30 km/h 作半径为 15 m 的圆周运动,某一时刻失效转向盘输入转角,记录转向盘的回正过程响应。

横摆角速度响应如图 9 所示。

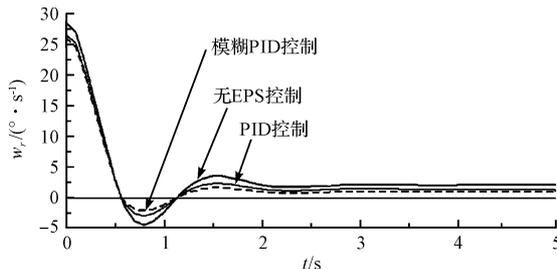


图 9 低速转向回正下的横摆角速度响应

侧向加速度响应如图 10 所示。

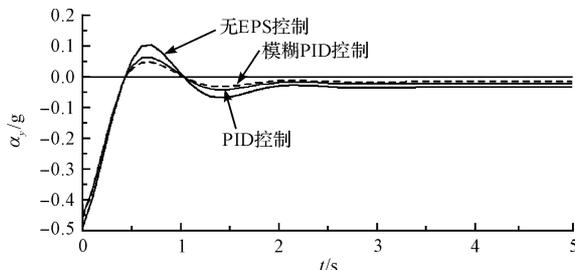


图 10 低速转向回正下的侧向加速度响应

由图可知:EPS 系统控制使得横摆角速度执行超调量降低,侧向加速度也明显下降,操纵稳定性得以提高,且相比 PID 控制,所设计的模糊 PID 控制器效果有所改善。对比 PID 控制,模糊 PID 控制的低速转向回正下的横摆角速度执行超调和侧向加速度峰值分别下

降 11.1% 和 28.6%。

5 结束语

本文运用 Adams/car 建立了分布式驱动电动汽车虚拟整车模型,基于 Matlab/Simulink 设计了电动助力转向控制系统, EPS 控制系统选用直线型助力特性曲线,对助力电机电流控制采用模糊 PID 控制并对联合仿真系统进行了验证。对不同工况的仿真结果分析,发现在改善转向轻便性的同时提高了操纵稳定性。分析其原因, EPS 系统助力电机电流受车辆复杂运行工况的影响而具有很强的不确定性,是典型的时变非线性系统。传统 PID 控制,不能对电流进行精确调整,助力电机运行状况恶化,系统控制精度较低。文中采用的模糊 PID 控制鲁棒性好、适应性强、动态响应好,因而提高了转向综合性能。

下一步研究将进一步优化电动助力转向控制系统,通过增加控制因素,如考虑车辆轴荷变化的影响来改善控制质量,寻找最优控制算法,减少车辆在湿滑等摩擦系数较小路面上进入转向失稳状态的可能性,提高汽车操纵性。

参考文献 (References):

- [1] 余卓平,刘 军,熊 璐,等. 分布式驱动电动汽车操纵性改善控制策略设计[J]. 同济大学学报,2014,42(7): 1088-1095.
- [2] 余卓平,冯 源,熊 璐. 分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述[J]. 机械工程学报,2013,49(8): 105-

114.

- [3] 李 刚,宗长富,陈国迎. 线控转向四轮独立驱动电动车的 AFS/DYC 集成控制[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(3):150-155.
- [4] MURATA S. Innovation by in-wheel-motor drive unit[J]. *Vehicle System Dynamics*,2012,50(6):807-830.
- [5] MURATA S. Vehicle dynamics innovation with in-wheel motor[C]. 1st International Electric Vehicle Technology Conference,Warrendale: SAE Technical Paper,2011.
- [6] 李 刚,宗长富. 四轮独立驱动轮毂电机电动汽车研究综述[J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版,2014,34(1):47-52.
- [7] MAKOTO K, KEVIN W, HIROAKI Y. Improvement of vehicle dynamic performance by means of in-wheel electric motors[J]. *Mitsubishi Motors Technical News*,2006(18): 106-112.
- [8] 戴一凡. 分布式电驱车辆纵向运动综合控制[D]. 北京:清华大学汽车工程系,2013.
- [9] 赵 斌. 电动助力转向系统建模仿真及电控单元的研究[D]. 湖南:湖南大学机械与运载工程学院,2012.
- [10] 季鹏凯,沈 斌,陈 慧,等. 主动转向系统的神经网络模型逼近自适应控制的研究[J]. 汽车工程,2014,36(1):107-113.
- [11] 赵万忠,李恽骏,于蕾艳,等. 融合助力转向功能的新型主动转向系统 LQG 控制策略[J]. 中国机械工程,2014,25(3):417-421.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

崔纪明,赵景波,王 响,等. 分布式驱动电动汽车 EPS 设计与联合仿真研究[J]. 机电工程,2018,35(5):507-511.

CUI Ji-ming, ZHAO Jing-bo, WANG Xiang, et al. Co-simulation and design of distributed driving electric vehicle EPS[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(5):507-511.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn