

C-EPS 硬件在环仿真平台设计与控制策略验证

王燮辉,李强,赵璐,张新闻

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

摘要: 为了方便管柱式电动助力转向(column type electric power steering,C-EPS)控制系统的设计与研究,应用 MATLAB/dSPACE 实时仿真系统等工具搭建了 C-EPS 硬件在环仿真平台。构建了转向阻力矩计算模块,并由 dSPACE 控制伺服电机来输出转向阻力矩;设计了具有助力模式、回正模式和故障模式的 C-EPS 控制策略,并利用本平台对电流跟随、转向助力轻便性等项目进行了硬件在环仿真试验。结果表明:电流跟随试验中电机实际电流相对目标电流约有 0.05 s 的滞后;在 5 km/h 的低速工况下转向输入力矩从 11 N·m 降到 2 N·m,具有较好的转向轻便性,且能实现主动回正功能;在 60 km/h 的高速工况下转向输入力矩随车速提高而增大,从而保证车辆具有良好的行驶稳定性。可见,我们所搭建的平台能够实现 C-EPS 控制策略的硬件在环仿真,这为 C-EPS 的后续开发打下了基础。

关键词: 管柱式电动助力转向;硬件在环;转向阻力矩;C-EPS 控制策略

中图分类号: U463.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2021)03-0239-09

Development and validation of hardware-in-the-loop simulation platform and control strategy for C-EPS

WANG Xiehui, LI Qiang, ZHAO Lu, ZHANG Xinwen

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, HangZhou, 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In order to facilitate the design and research of column type electric power steering(C-EPS) control system, the C-EPS hardware-in-the-loop simulation platform was developed by applying MATLAB/dSPACE real-time simulation system. The steering resistance torque calculation module was established, and the servo motor which controlled by dSPACE was used to output steering resistance torque. The C-EPS control strategy which includes assistance

收稿日期: 2020-09-02

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY21E050001)

通信作者: 李强(1979—),男,江苏省溧阳人,教授,博士,主要从事新能源汽车机电一体化控制研究。E-mail: liqiang@zust.edu.cn。

mode, return-to-center mode and fault mode was designed. Furthermore, the hardware-in-the-loop simulation tests were carried out on this platform to test items like current following and power steering handiness. The simulation test results indicate that, the actual current of the motor lags behind the target current by 0.05 s in current following test; the steering input torque reduces from 11 N·m to 2 N·m under the low-speed condition of 5 km/h, while the C-EPS has sound steering handiness and active return-to-center function; the steering input torque rises with the increase of vehicle speed under the high-speed condition of 60 km/h, so the driving stability can be guaranteed. This test platform can realize the hardware-in-the-loop simulation for C-EPS control strategy, and lay the foundation for the subsequent development of C-EPS.

Keywords: C-EPS; hardware-in-the-loop; steering resistance torque; C-EPS control strategy

随着电子制造业的发展和新能源汽车产销量的不断提升,电动助力转向(electric power steering, EPS)除了不断占据传统燃油汽车转向系统的市场份额外,由于生产成本的降低,也在众多新能源汽车中逐渐普及。特别是助力电机和控制器布置在驾驶室中的管柱式电动助力转向(column type electric power steering, C-EPS),其体积小、集成度高、防护要求低,适配各类无助力或液压助力转向车型,二次开发灵活度高,因此 C-EPS 的市场占有率不断提高。在 C-EPS 系统实车试验过程中需要大量的人力、物力,试验费用高,而且具有一定的危险性^[1];在其标定调试过程中,主要验证的助力效果,容易受到测量环境和主观感受的影响。硬件在环仿真平台则将系统工作所需的硬件嵌入仿真中,节省复杂的硬件建模过程,能够提供被测系统真实的反馈^[2],因此通过硬件在环仿真开发平台试验研究可以提高 C-EPS 的开发效率,降低开发成本。目前国内在 EPS 硬件在环仿真平台的试验研究中取得了一定的成果。雷发荣^[3]使用 Moto Trom 平台完成了转向助力台架的开发和控制策略的设计,使用伺服电机作为阻力加载系统,在转向轻便性和回正试验中取得了较好的结果;曹艳玲等^[4]使用电动推杆作为转向阻力加载装置,成本较低,模拟了原地转向工况和行驶转向工况,对电机电流、助力扭矩进行实时监测;廖林清等^[5]使用基于 VB6.0 自主设计试验台架测试软件,并使用电液伺服装置模拟转向阻力矩,试验台能够稳定运行,并具有较高的测试精度,能实现自动化测试;彭冲等^[6]使用一套附加的 EPS 系统作为阻力加载装置,并使用一套弹簧装置作为阻力加载补偿,结构上有一定的创新,且阻力加载装置响应较快;胡宏德^[7]使用液压系统作为转向系统的阻力加载装置,试验台具有机械调节装置以适配不同规格的 EPS 系统,并进行转向轻便性试验;吕荣辉等^[8]使用 dSPACE 实时仿真系统对 EPS 系统的电子控制单元(electronic control unit, ECU)执行信号的检测,仿真精度较高;梁诚^[9]使用基于 Labview PXI 的 EPS 试验台,结合 CarSim 对 EPS 进行硬件在环仿真,将虚拟车辆动态和 EPS 实物进行结合,可直观地显示 EPS 的工作性能和试验结果。

总体而言,上述试验平台仅用于 EPS 性能的测试,缺乏对 EPS 的主观评价与控制策略在线修改能力。因此,为实现 C-EPS 控制策略的快速原型设计、主观评价及在线修改功能,本研究首先设计 C-EPS 系统硬件在环仿真平台的机械结构,选择伺服电机作为转向阻力矩加载装置;其次,将二自由度汽车动力学模型和悬架参数相结合,以车速、转向盘转角和转向输入力矩作为主要输入,在 MATLAB/Simulink 中建立转向阻力矩计算模块;再次,使用 Controldesk 建立试验平台人机交互界面,通过 dSPACE 实时仿真系统控制伺服电机模拟转向阻力矩;最后,建立 C-EPS 控制策略并导入 dSPACE 实时系统,完成控制策略的硬件在环仿真试验及主观评价。

1 硬件在环仿真试验平台的搭建

1.1 研究对象

选取某小型电动厢式物流车及其 C-EPS 作为研究对象,物流车整车及其 C-EPS 规格参数见表 1。

表 1 物流车整车及其 C-EPS 规格参数

Table 1 Specification parameters of logistics vehicle and C-EPS

参数	数值	参数	数值
整车质量/kg	1 200	转向系传动比	16.41
轴距/mm	2 700	C-EPS 减速器减速比	16.5
质心位置/mm	1 255.5	C-EPS 电机额定功率/W	180
车轮静力半径/mm	307	C-EPS 电机额定电流/A	15
车轮胎压/MPa	0.3	C-EPS 电机额定电压/V	12

1.2 转向阻力矩加载装置的确定和匹配

常见的阻力矩加载装置有螺旋弹簧、液压装置、磁粉制动器及伺服电机。螺旋弹簧结构简单紧凑,可靠性高,但是螺旋弹簧模拟的单一线性阻力矩与实际转向阻力矩差别较大;液压装置成本较高、结构复杂、体积较大和维护成本较高;磁粉制动器虽能很好地模拟转向阻力矩,但无法模拟转向回正阻力矩,对转向回正功能较难测试;伺服电机需与行星齿轮减速器相配合,以作为转向阻力矩加载装置,它通过输出不同的力矩来模拟不同的转向阻力矩,并具有结构紧凑、响应快、精度高的优点。本研究选用的伺服电机和行星齿轮减速器规格参数见表 2。

表 2 伺服电机和行星齿轮减速器规格参数

Table 2 Specifications of servo motor and planetary gear reduce

参数	数值	参数	数值
伺服电机额定输出功率/kW	0.75	伺服电机转矩参数/(N·m·A ⁻¹)	0.57
伺服电机额定转矩/(N·m)	2.39	伺服电机转动惯量/(kg·m ²)	0.000 203
伺服电机峰值扭矩/(N·m)	7.16	行星齿轮减速器减速比	16
伺服电机额定电流/A	4.8	行星齿轮减速器满载效率	0.94
伺服电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	行星齿轮减速器转动惯量/(kg·m ²)	0.000 5

阻力矩加载装置的最大模拟工况,可根据汽车原地转向阻力矩经验公式的变形公式^[10]来计算:

$$G = \sqrt[3]{\left(\frac{3T_{\text{smax}}i_p}{fi_{s0}}\right)^2 p} \quad (1)$$

式(1)中: f 为附着系数,一般取 0.7; T_{smax} 为助力电机峰值扭矩; i_p 为行星齿轮减速器减速比; i_{s0} 为转向系总传动比,小型车辆的转向传动比一般为 15~20; G 为前轴满载载荷。根据式(1)计算可得阻力加载装置最大可模拟前轴载荷为 21 kN 车辆的原地转向阻力矩,试验平台在留有一定的余量后,可满足包括小型乘用车、小型货车的 C-EPS 开发与试验。

1.3 硬件在环仿真平台的结构和原理

硬件在环仿真平台总体结构如图 1 所示,主要由 C-EPS 总成、伺服电机总成、助力电机驱动器、dSPACE 实时仿真系统和上位机等组成。dSPACE 实时仿真系统作为 MATLAB/Simulink 开发环境的自动编解码器,无需手动编程即可在仿真过程中实时优化控制策略^[11]。dSPACE 采集 C-EPS 系统的转向输入力矩信号、转角信号、助力电机电流信号、伺服电机转速和转角信号,通过上位机设计的 Controldesk 实时界面进行人机交互,试验人员根据转向手感的主观评价及系统运行状态,在 MATLAB/Simulink 中对 C-EPS 控制策略进行不断的调整和完善,并将优化后的控制策略重新生成代码后导入 dSPACE 实时系统,完成对基于硬件在环仿真的 C-EPS 控制策略的开发和优化。

硬件在环仿真平台实物如图 2 所示,主体框架采用铝型材,C-EPS 总成的安装支架为可调式,在一定程度上适配不同尺寸的 C-EPS 总成,下端行星齿轮减速器输出轴与 C-EPS 总成输出轴的联轴器总成由梅花联轴器、万向节和尼龙轴组成,在一定程度上可弥补 C-EPS 输出轴与行星齿轮减速器输出轴的同轴度误差,降低仿真硬件在环仿真平台运行时的振动与噪声。

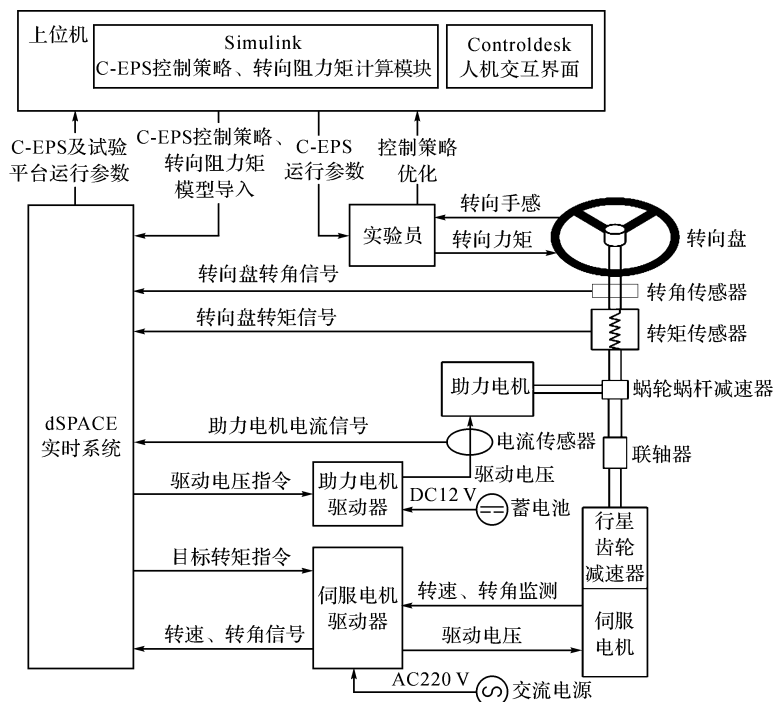


图 1 硬件在环仿真平台总体结构

Fig. 1 Structure of hardware-in-the-loop test platform

2 转向阻力矩计算模块的建立

汽车在高速和低速工况下行驶时,由转向盘转角和车辆侧向加速度产生的转向阻力矩占比并不相同^[12],因此需要设计全工况的转向阻力矩计算模块,为降低转向阻力矩计算的复杂程度,便于在项目初期的试验工作,采用汽车二自由度动力学模型和前悬架参数建立转向阻力矩计算模块。转向总阻力矩 T_R 由四部分组成:轮胎与地面的摩擦阻力矩 T_{R1} ,前轴抬升的重力回正力矩 T_{R2} ,侧向力回正力矩 T_{R3} 及悬架和转向系内部摩擦力矩 T_{R4} 。

根据笔者所在企业开发的 EPS 控制策略工况划分,0~10 km/h 属于低速工况,转向阻力矩主要由车轮与地面的摩擦阻力矩 T_{R1} 构成,在原地转向时最大,在 0~10 km/h 随着车速的提高迅速降至一个较低的水平,因此在项目开发初期,为降低控制策略和助力电机的匹配难度, T_{R1} 可近似看作线性降低至 0,由如下经验公式来确定:

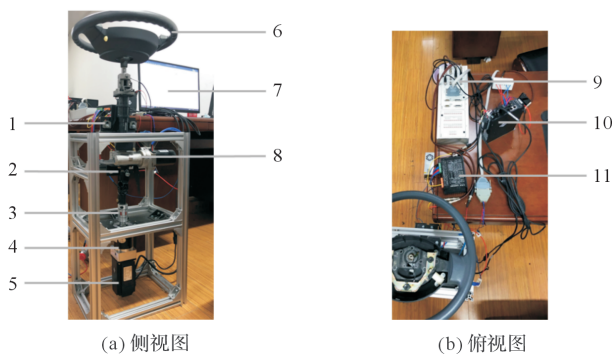
$$T_{R1} = \frac{Kf}{3} \sqrt{\frac{G^3}{p}} \quad (2)$$

式(2)中: K 为速度系数,当车速为 0 时取 1,随车速的提高而线性减小,当车速达到 10 km/h 时降至 0。

前轴抬升的重力回正力矩由转向轮主销内倾角产生的回正力矩和主销偏移距产生的回正力矩组成,其计算公式如下:

$$T_{R2} = \eta_1 G \left[s_1 \sin \frac{\delta_{in} + \delta_{out}}{2} \sin 2\gamma + \frac{1}{2} s_2 (\cos \delta_{in} - \cos \delta_{out}) \right] \quad (3)$$

式(3)中: η_1 为转向系逆效率,取 0.65; s_1 为轮心点至主销轴线的水平距离,取 89.96 mm; δ_{in} 为内转向轮



1—C-EPS 上安装支架;2—C-EPS 下安装支架;3—联轴器总成;4—行星齿轮减速器;5—伺服电机;6—转向盘;7—上位机;8—C-EPS;9—dSPACE 实时仿真系统;10—伺服电机驱动器;11—助力电机驱动器。

图 2 硬件在环仿真平台实物

Fig. 2 Entities of hardware-in-the-loop test platform

转角; δ_{out} 为外转向轮转角; γ 为前轮主销内倾角, 取 0.19 rad ; s_2 为主销偏移距, 取 29.14 mm 。

由于车轮拖距的存在, 作用在转向轮上的侧向力会产生一个绕主销的侧向力回正力矩 T_{R3} , 根据二自由度车辆模型和前后轮侧偏角, T_{R3} 计算公式如下:

$$T_{R3} = \frac{\eta_1 m r u^2 \sin\left(\frac{2\theta_c}{i_s} - \frac{l\omega_r}{u}\right) \sin\sigma \cos\gamma}{l \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\theta_c}{i_s} + \beta + \frac{\alpha\omega_r}{u}\right) \cos\left[\beta - \frac{(l-\alpha)\omega_r}{u}\right]} \quad (4)$$

式(4)中: u 为车辆行驶车速; θ_c 为转向盘转角; ω_r 为车辆横摆角速度; σ 为前轮主销后倾角, 取 0.11 rad ; i_s 为物流车转向系总传动比; β 为车辆质心侧偏角。

转向系内部摩擦力矩 T_{R4} 一般由经验值确定, 取 $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

转向摩擦阻力矩与转向角速度的方向相反, 转向回正阻力矩与转向角度的方向相反, 作用在转向管柱上的转向总阻力矩为

$$T_{Rc} = [\text{sgn}(\dot{\theta}_c)(T_{R1} + T_{R4}) + \text{sgn}(\theta_c)(T_{R2} + T_{R3})] \frac{1}{i_s \eta_2} \quad (5)$$

式(5)中: η_2 为转向系正效率, 取 0.75 。

驾驶员进行转向动作时, 转向盘转速和转角的方向一致, 作用在转向管柱上的转向总阻力矩的三维曲面图如图 3(a) 所示。此时, 转向摩擦阻力矩和转向回正力矩的方向相同, 阻碍驾驶员转向, 当车速小于 10 km/h 时, 转向摩擦阻力矩在转向总阻力矩中占比较大, 但随着车速的提高而降低; 当车速大于 10 km/h 时, 转向回正力矩在转向总阻力矩中占比较大, 并随着车速的提高及转向盘转角的增加而增大。

驾驶员进行回正动作时, 转向盘转速和转角的方向相反, 作用在转向管柱上的转向总阻力矩三维曲面图如图 3(b) 所示。此时, 转向摩擦阻力矩与转向盘速度的方向相反, 阻碍转向盘回正, 转向回正力矩与转向盘转角的方向相反, 当车速小于 10 km/h 时, 转向摩擦阻力矩占比较大, 转向盘无法自动回正, 需要驾驶员手动回正; 当车速处于 $20 \sim 40 \text{ km/h}$ 时, 转向盘能够自动回正, 但由于转向盘在转角较小时回正力矩较小, 因此转向盘无法完全回正到位; 当车速大于 40 km/h 时, 转向盘能够完全回正, 并且回正性能随着车速的提高和转向盘转角的增加而增强。

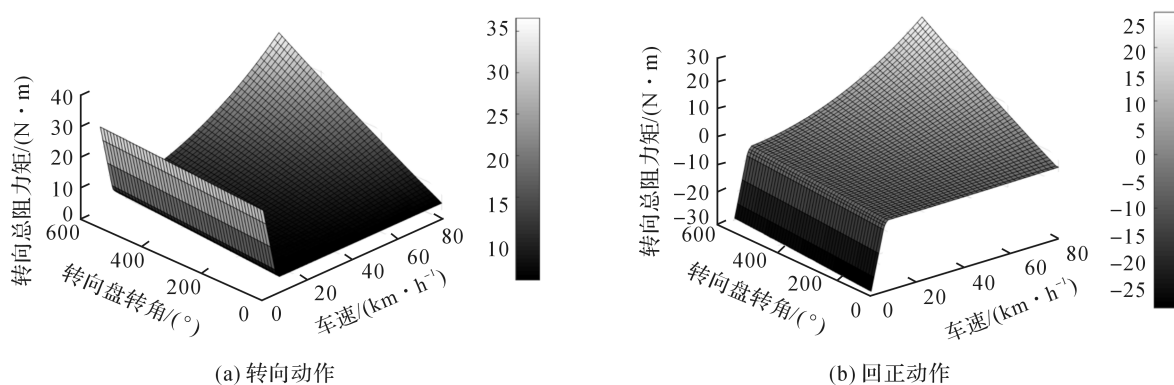


图3 作用在转向管柱上的转向总阻力矩三维曲面图

Fig. 3 MAP of total steering resistance converted to steering column

3 C-EPS 数学模型和控制策略的建立

3.1 C-EPS 数学模型

以转向管柱芯轴作为参考对象, 建立其动力学方程和动态电路方程如下:

$$\begin{cases} T_m j - (J_m j + J_c) \ddot{\theta}_c - (B_m j + B_c) \dot{\theta}_c = T_h - T_{Rc}; \\ Li_a + Ri_a + K_b \dot{\theta}_c j = U_d; \\ T_m = K_e i_a. \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: T_m 为助力电机输出转矩; J_m 为电机转动惯量,取 $0.000\ 5\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_c 为管柱转动惯量,取 $0.18\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_m 为电机阻尼,取 $0.003\ 5\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$; T_h 为转向输入力矩; L 为电枢电感,取 $280\ \mu\text{H}$; i_a 为电枢电流; R 为电枢电阻,取 $0.4\ \Omega$; K_b 为反电势系数,取 $0.107\ \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}$; U_d 为电机电枢电压; K_e 为电磁转矩常数,取 $0.107\ (\text{N} \cdot \text{m})/\text{A}$ 。

助力电机的驱动器可用一阶滞后环节传递函数表示:

$$W_s(S) = \frac{K_s}{T_s S + 1} \quad (7)$$

式(7)中: K_s 为触发整流环节放大系数,取 1.2 ; T_s 为整流电路平均失控时间,取 $0.1\ \text{s}$ 。

根据上述 C-EPS 数学模型及电机驱动器传递函数,建立 C-EPS 仿真模型,如图 4 所示。

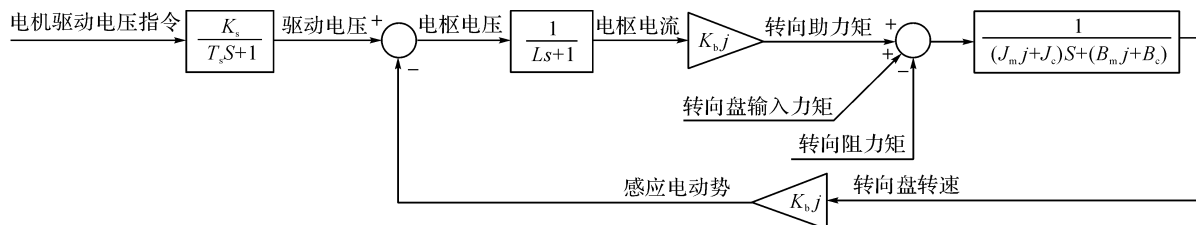


图 4 C-EPS 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of C-EPS

3.2 C-EPS 控制策略的设计

C-EPS 的控制策略需要保证低速时车辆转向的轻便灵活及回正性能,高速时车辆转向稳定可靠及抑制回正超调^[13]。本研究建立的 C-EPS 控制策略如图 5 所示。

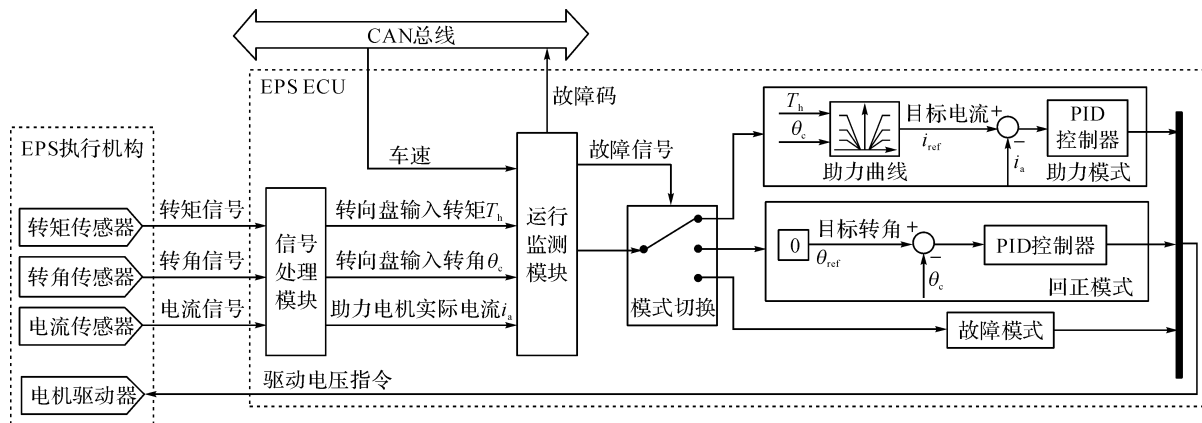


图 5 C-EPS 控制策略

Fig. 5 C-EPS control strategy

转向输入力矩信号、转向盘转角信号和助力电机电流信号经处理后,与来自 CAN(controller area network, 控制器局域网)总线的车速模拟信号一并进入运行监测模块,以实现 C-EPS 总成的开机自检、运行监测和报错功能。若监测到传感器信号和车速信号异常,则切换至故障模式。根据故障类型和故障严重程度的不同,通过 C-EPS 驱动电压的控制,实现 C-EPS 在故障状态下的恒功率、降功率运行或停机,以提高 C-EPS 的安全性。若 C-EPS 各部分功能正常,则根据 C-EPS 运行状态,在助力模式和回正模式之间自动切换。助力模式和回正模式之间的切换根据转向盘转速和转角乘积^[14]来判断:当转向盘转角和转向盘转速的乘积大于或等于 0 时,即为助力模式;当转向盘转角和转向盘转速的乘积小于 0 时,即为回正模式。

助力模式和回正模式均采用 PID 控制器(proportion-integral-derivative controller, 比例-积分-微分控制器)来控制电机。由于篇幅所限,本研究主要对 C-EPS 的助力模式进行硬件在环仿真试验研究。

为方便调节和优化,选择直线型转向助力曲线,建立如图 6 所示的直线型转向助力曲线族。一定车速范围内,理想的转向输入力矩随着车速的提高而增大^[15]。因此在低速工况下,C-EPS 提供较大的助力力矩;但随着车速的提高,助力力矩降低,当车速达到 $80\ \text{km/h}$ 及以上时,助力电机不再输出助力力矩。

电机助力力矩的大小与电机工作电流正相关,因此,对转向助力矩的控制主要为对电机输入电流的控制。每条助力曲线的助力力矩和转向盘输入力矩的函数关系为

$$T_{ai} = \begin{cases} 0, 0 \leq T_h < 1; \\ k_i T_h - k_i, 1 \leq T_h < 6; \\ T_{\max}(u_i), 6 \leq T_h. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: u_i 为助力曲线族中每条助力曲线的车速; $T_{\max}(u_i)$ 为每条助力曲线的最大助力值; k_i 为速度感应系数。每条助力曲线之间的目标助力转矩采用线性插值法确定,其计算公式如下:

$$T_a = \frac{T_{ai} + T_{ai+1}}{u_i - u_{i+1}}(u - u_{i+1}) + T_{ai+1}。 \quad (9)$$

助力模式 PID 参数采用 MATLAB/GADST 遗传算法直接搜索工具箱进行优化^[16]。PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 为自变量,优化范围均为 0~300,遗传代数数为 100 代,选用时间乘以绝对误差积分(integrated time absolute error, ITAE)作为性能评价指标^[17]:

$$J_v = \int_0^{+\infty} t |e(t)| dt。 \quad (10)$$

式(10)中: J_v 为 ITAE 值; $e(t)$ 为绝对误差。

遗传算法优化曲线与结果如图 7 所示,完成 100 代遗传后,得到 ITAE 极小值为 0.035 370 6, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 122.739 3、299.851 6、11.904 7。优化后的助力电流阶跃响应曲线如图 8 所示,响应时间为 0.01 s,稳态值为 6.1 A,稳定时间为 3.8 s,超调量为 0.5%,优化后的控制器参数取得了良好的控制效果。

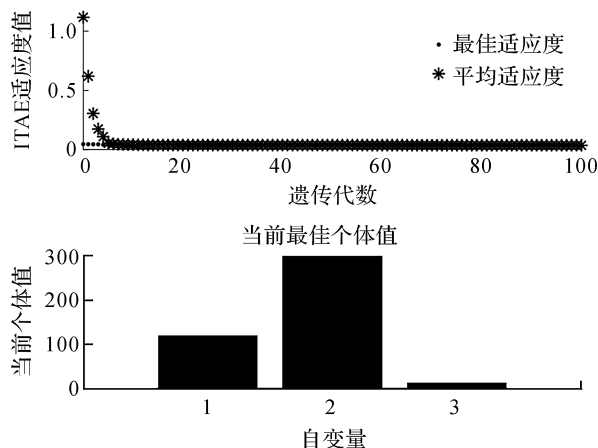


图7 遗传算法优化曲线与结果

Fig. 7 Optimization curve and result of genetic algorithm

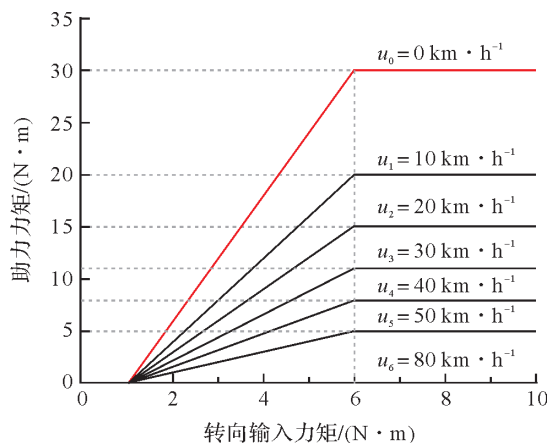


图6 直线型转向助力曲线族

Fig. 6 Straight-type power steering curve family

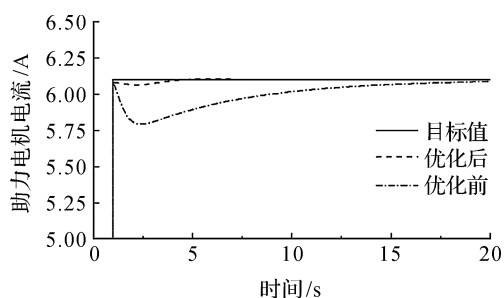


图8 优化前后的助力电机电流阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response curves of assisted motor current before and after optimization

4 硬件在环仿真试验及分析

硬件在环仿真平台使用 Controldesk 作为数据采集和试验控制的人机交互界面。Controldesk 提供了控制、监视和自动化试验等功能,支持 MATLAB/Simulink 一键生成代码并导入 dSPACE。选取电流跟随试验、转向助力轻便性试验作为 C-EPS 性能测试的主要试验项目。

4.1 电流跟随试验

如图 9 所示的电流跟随试验曲线,设定车速为 10 km/h,2 s 时阶跃转向输入力矩为 3 N·m,电机实际电流跟随目标电流立即达到 4.5 A 峰值,经过 3 s 的不规则波动后,电流迅速减小为 0 A。从试验数据中可以发现,电机实际电流相对目标电流约有 0.05 s 的滞后,其主要原因是建立 C-EPS 数学模型时,未

考虑传感器信号的滞后性,从而导致实际试验时电机电流的滞后;当电流达到峰值时,目标电流和电机实际电流具有明显的波动,实际转向手感具有轻微的齿轮啮合感,这可能是由于助力电机在低速运转情况下发生电流值扰动,从而导致助力力矩的波动。

4.2 转向轻便性试验

为验证所设计的 C-EPS 硬件在环仿真平台的功能与 C-EPS 控制策略的效果,转向盘以正反 180° 为一个转动周期,分别在 5、20、60 km/h 的工况下进行转向轻便性试验,转向轻便性试验结果如图 10 所示。从图 10(a)可以看出,C-EPS

未工作时,转向输入力矩约为 $11 \text{ N} \cdot \text{m}$,低速下转向阻力矩主要为摩擦阻力矩,转向盘需要施加转向输入力矩手动回正;当 C-EPS 工作时,转向输入力矩约为 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$,且可实现不施加转向输入力矩转向盘自动回正的功能。从图 10(b)可以看出,C-EPS 未工作时,转向输入力矩约为 $4 \sim 6 \text{ N} \cdot \text{m}$,随转向盘转角增大而增大,转向阻力矩中转向回正力矩占比升高,但由于转向摩擦阻力矩的存在,需要施加 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右转向输入力矩进行转向盘回正;当 C-EPS 工作时,转向输入力矩约为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$,转向盘可自动回正。从图 10(c)可以看出,C-EPS 未工作时,转向输入力矩随转向盘转角的增大而增大,约为 $5 \sim 9 \text{ N} \cdot \text{m}$,转向阻力矩主要由转向回正力矩组成,回正力矩大小约为 $0 \sim 2 \text{ N} \cdot \text{m}$,随转向盘转角减小而减小;当 C-EPS 工作时,转向输入力矩大小为 $4 \sim 6 \text{ N} \cdot \text{m}$,随转向盘转角增大而增大。通过图 10(a)~(c)对比发现,C-EPS 能够实现转向输入力矩随车速提高而增加的特性,这有利于高速状态下的行驶稳定性及行车安全性。

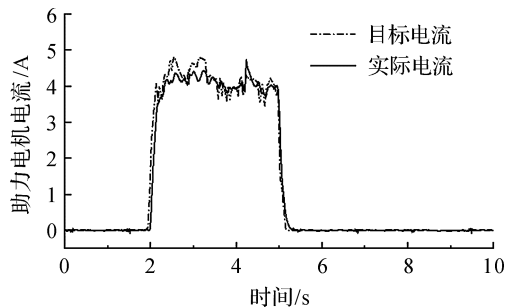


图 9 电流跟随试验曲线

Fig. 9 Current following test curve

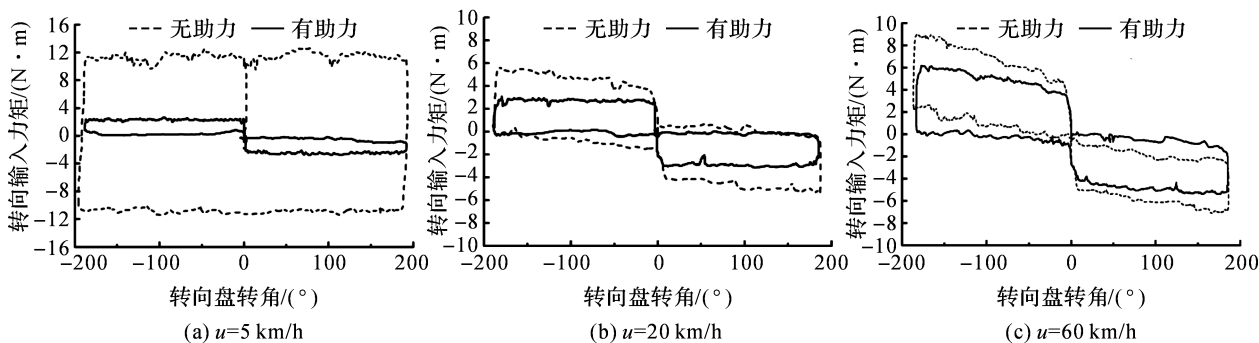


图 10 C-EPS 转向轻便性试验结果

Fig. 10 Results of C-EPS steering agility handiness test

5 结 语

本研究基于 MATLAB/Simulink 和 dSPACE,搭建了 C-EPS 硬件在环仿真平台,并设计了 C-EPS 控制策略。通过 C-EPS 硬件在环仿真平台的硬件在环试验结果可知,我们设计的 C-EPS 控制策略可较好地实现转向轻便性与主动回正功能,实现了转向输入力矩随速增加的转向手感。同时试验结果还表明,我们开发的平台能快速地对 C-EPS 控制策略进行验证,可较好地模拟各工况下的转向阻力矩,并能够对 C-EPS 运行参数进行实时监测与反馈,实现 C-EPS 的主观评价,以及及时发现 C-EPS 在软硬件上的不足之处。因此,本平台具有一定的工程应用价值,可为加快 C-EPS 的 ECU 产业化进程奠定基础。

参考文献:

- [1] 李洪强,孟建兵,曲宝军,等.基于 LabVIEW 的 EPS 性能试验台测控系统[J].山东理工大学学报(自然科学版),2019,33(5):6.
- [2] 陈无畏,刘翔宇,杨军,等.基于 LabVIEW 的车辆稳定性控制硬件在环系统[J].中国机械工程,2010,21(23):2882.
- [3] 雷发荣.基于 Moto Trom 的 EPS 试验台架的设计与验证[D].南宁:广西大学,2016.

- [4] 曹艳玲,曹增,徐立友.电动助力转向在环仿真试验台的开发[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(2):139.
- [5] 廖林清,石宏春,张君,等.汽车电动助力转向系统性能测试系统设计[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(6):41.
- [6] 彭冲,姚波,李连.一种新型电动助力转向试验台开发[J].客车技术与研究,2018,40(4):47.
- [7] 胡宏德.汽车电动助力转向实验台设计[J].湖北汽车工业学院学报,2013,27(3):23.
- [8] 吕荣辉,石维佳,张宏超.基于 dSPACE 的 EPS 系统 ECU 硬件在环实验台设计与应用[J].汽车实用技术,2017(2):114.
- [9] 梁诚.电动助力转向系统仿真分析及台架试验[D].淮南:安徽理工大学,2019.
- [10] 刘涛.汽车设计[M].北京:北京大学出版社,2008:289.
- [11] LI Q, CHEN W, HE R. The new measurement and calculation method for dynamic parameters of DC motor based on dSPACE system[J]. Advanced Materials Research,2012,562/563/564:1497.
- [12] 赵林峰,从光好,邵文彬,等.线控转向车辆转向盘转矩特性研究[J].机械工程学报,2018,54(24):139.
- [13] 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[J].机械工程学报,2009,45(6):183.
- [14] 胡建军,卢娟,秦大同,等.电动助力转向系统的建模和仿真分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2007,30(8):12.
- [15] 任夏楠,邓兆祥.驾驶员理想转向盘力矩特性研究[J].中国机械工程,2014,25(16):2264.
- [16] 赵丽娟,范佳艺.基于遗传算法的采煤机螺旋滚筒多目标优化设计[J].中国机械工程,2018,29(5):595.
- [17] 牛芾洁,王玉洁,唐剑.基于遗传算法的 PID 控制器参数优化研究[J].计算机仿真,2010,27(11):181.

(上接第 233 页)

- [11] GAO D, TONG Y, SHE J, et al. Top-k team recommendation and its variants in spatial crowdsourcing[J]. Data Science and Engineering,2017,2(2):136.
- [12] ZHENG L, CHEN L. Maximizing acceptance in rejection-aware spatial crowdsourcing[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,2017,29(9):1943.
- [13] IWASAWA M, WANG L, NITADORI K, et al. Global simulation of planetary rings on sunway taihulight[C]//International Conference on Computational Science. Wuxi: Springer,2018:483.
- [14] FANG J, FU H, ZHAO W, et al. Swdnn: a library for accelerating deep learning applications on sunway taihulight [C]//2017 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium(IPDPS). Florida: IEEE,2017:615.
- [15] TONG Y, ZHOU Z. Dynamic task assignment in spatial crowdsourcing[J]. ACM Special Interest Group on Spatial Information Special,2018,10(2):18.
- [16] KAZEMI L, SHAHABI C. GeoCrowd: enabling query answering with spatial crowdsourcing[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems(SIGSPATIAL'12). New York: Association for Computing Machinery,2012:189.
- [17] 程晓歌,吴瑞诚.基于主成分分析的用户房间兴趣度计算方法及系统:201610514089.2[P].2016-11-162.
- [18] ZHENG H, WU J. Online to offline business: urban taxi dispatching with passenger-driver matching stability[C]//2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS). Atlanta: IEEE,2017:816.
- [19] GAO G, XIAO M, ZHAO Z. Optimal multi-taxi dispatch for mobile taxi-hailing systems [C]//The 45th International Conference on Parallel Processing(ICPP). Philadelphia: IEEE,2016:294.
- [20] XU Z, LI Z, GUAN Q, et al. Large-scale order dispatch in on-demand ride-hailing platforms: a learning and planning approach[C]//Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. London: Association for Computing Machinery,2018:905.
- [21] HAMAMADA T, NITADORI K. 190 TFlops astrophysical n-body simulation on a cluster of GPUs [C]//Proceedings of the 2010 ACM. New Orleans: IEEE,2010:1.
- [22] 赵礼峰,陈华,宋常城,等.求解网络最大流的筛选算法[J].模糊系统与数学,2010(24):157.
- [23] Didi.滴滴盖亚开放数据计划[DB/OL].[2020-01-12].<https://gaia.didichuxing.com>.