

基于 UIO 的 EPS 系统状态反馈最优控制

郑太雄¹ 周花¹ 李永福¹

摘 要 准确地获知电动助力转向 (Electric powering steering, EPS) 系统阻力矩是提高行车安全的一个重要因素. 针对车辆转向过程中, 由不同附着路面上 EPS 系统所需辅助力矩与转向路感之间的差别而可能导致的误操纵问题, 本文基于 2 自由度整车动力学的 EPS 系统模型, 结合轮胎特性, 以轮胎侧偏角和理想路面附着系数为输入, 通过设计非线性观测器估计当前路面的附着系数, 以获取 EPS 系统阻力矩; 进而, 根据 EPS 系统模型, 运用未知输入观测器 (Unknown input observer, UIO) 估算方向盘输入转矩, 并基于 EPS 系统状态反馈以实现对 EPS 系统的无传感器最优控制. 最后, 对基于永磁同步电机 (Permanent magnet synchronous motor, PMSM) 的 EPS 系统进行仿真实验分析. 结果表明: 在以电机 q 轴电流闭环误差最小为指标函数情形下, 本设计的方向盘回正残留角从 25° 降到 0° , 能有效抑制系统外界干扰, 提高了转向时人-车系统的鲁棒性.

关键词 电动助力转向, 未知输入观测器, 状态反馈, 阻力矩, 助力-回正特性

引用格式 郑太雄, 周花, 李永福. 基于 UIO 的 EPS 系统状态反馈最优控制. 自动化学报, 2014, 40(7): 1433–1441

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01433

Optimal State Feedback Control of EPS System Based on UIO

ZHENG Tai-Xiong¹ ZHOU Hua¹ LI Yong-Fu¹

Abstract To obtain the resistance moment of the EPS (Electric powering steering) system accurately is an important factor to improve the traffic safety. Considering that the difference between assist torque and road feel of the EPS system under different kinds of pavement may lead to incorrect manipulation when a vehicle is steering, a nonlinear observer based on the two-degree-freedom vehicle dynamics model and tire characteristics is designed to estimate the adhesion coefficient of the current pavement with the side-slip angle and ideal surface adhesion coefficient as inputs. Consequently, the resistance moment can be obtained. Then, according to the EPS model, the unknown input observer (UIO) is designed to estimate the steering wheel input torque. Therefore, the sensorless optimal control of the EPS system can be conducted in terms of the state feedback. Finally, the corresponding simulations are carried out through the EPS system with PMSM. The results show that in the case of the minimum of the q -axis closed-loop current error of the PMSM, the steering wheel residual angle in this approach can be reduced from 25° to 0° , which can realize disturbance rejection and improve the steering robustness of the human-vehicle system effectively.

Key words Electric powering steering, unknown input observer, state feedback, resistance moment, dynamic returnability characteristics

Citation Zheng Tai-Xiong, Zhou Hua, Li Yong-Fu. Optimal state feedback control of EPS system based on UIO. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(7): 1433–1441

收稿日期 2013-07-24 录用日期 2013-11-26
Manuscript received July 24, 2013; accepted November 26, 2013
国家自然科学基金 (61304197), 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ130506), 重庆市工程技术研究中心建设项目 (cstc2011pt-gc3005-1), 重庆邮电大学青年基金 (A2012-78), 重庆邮电大学博士启动项目 (A2012-26) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61304197), Natural Science Foundation of CQJW (KJ130506), Chongqing Engineering Research Center Project (cstc2011pt-gc3005-1), Natural Science Foundation of CQUPT (A2012-78), Doctoral Start-up Funds of CQUPT (A2012-26)

本文责任编辑 胡昌华

Recommended by Associate Editor HU Chang-Hua

1. 重庆邮电大学自动化学院汽车电子与嵌入式系统工程研究中心 重庆 400065

1. Institute of Automotive Electronic and Embedded System, College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065

EPS 系统通过电机辅助力矩完成车辆转向, 提高了车辆的操纵稳定性和转向灵活性, 是未来汽车助力转向系统的发展方向^[1–2]. 但由于该系统存在测量误差、路面激励、机械消耗等复杂的非线性和不确定因素^[3–6], 近年来引起了国内外学者广泛关注并进行了重点研究. 受到文献 [7–9] 关于高增益未知输入滑模观测器相关设计方法的启发, 针对 EPS 系统方向盘转矩传感器价格与测量精度之间的相互制约, Mahmoud 等^[10] 将 UIO 引入到 EPS 系统, 以方向盘转矩与车轮阻力矩作为系统未知输入信号对其进行估计, 实现了 EPS 系统无传感器技术, 然而该方法并未详细阐述转向车轮对 EPS 系统的影响. 另外, 车辆在转向过程中, 当前路面的附着情况

对于行车安全性和稳定性有着较大影响,然而目前国内对转向工况下的路面附着系数研究较少,文献[11–13]便以此为切入点,详细分析了不同路面上车辆的转向情况,依据车辆模型设计观测器以估算当前路面的附着系数,不足之处在于仅给出了简单的观测流程,详尽的估计算法并未提及.文献[14]根据随动最优控制技术,建立EPS系统状态方程,设计了基于扰动抑制的最优控制器,从控制策略的角度试图抑制系统测量噪声与路面干扰,虽然该方法具有一定的效果,但仅是通过优化控制算法来试图消除系统中的各类干扰信号,而未深入研究EPS系统扰动的根源,所以并不能完全消除EPS系统的扰动.上述研究均针对EPS系统中存在的某一非线性方面进行了侧重探讨,弱化了其他不确定因素对现有EPS系统的影响;并且所提出的控制算法过于复杂,成本与代价过高.

本文根据上述方法中存在的不足,综合考虑EPS系统的人-车环境,建立EPS系统模型,结合轮胎模型设计了非线性观测器估计当前路面的附着系数,从而计算得出系统阻力矩.根据EPS系统状态方程运用UIO对方向盘转矩进行观测,实现了EPS无传感器控制.最后以PMSM实际助力电流与目标电流误差最小作为系统性能指标函数设计EPS系统状态最优控制器.仿真实验结果显示本文所设计的EPS系统能够有效抑制外界扰动,满足车辆操作稳定性要求.

1 EPS系统模型

1.1 转向柱及输出轴

根据力矩平衡方程得出转向柱及输出轴的数学模型^[14]:

$$J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s + K_s \theta_s = T_d + K_s \frac{X}{R_p} \quad (1)$$

$$J_e \left(\frac{\ddot{X}}{R_p} \right) + B_e \left(\frac{\dot{X}}{R_p} \right) = T_d + T_a - T_r \quad (2)$$

$$T_a = GK_m \left(\theta_m - G \frac{X}{R_p} \right) \quad (3)$$

式中, J_s 、 B_s 和 K_s 分别是转向轴转动惯量、粘性阻尼系数与刚性系数; θ_s 、 θ_m 分别为方向盘转角与电机转角; T_d 、 T_a 、 T_r 分别代表方向盘转矩、电机助力转矩与轮胎转向阻力矩; X 为齿条位移量; R_p 为齿条半径; G 为减速器传动比; J_e 、 B_e 分别为减速机构转动惯量与阻尼系数; K_m 为助力电动机刚性系数.

1.2 PMSM

永磁同步电机采用 $i_d \equiv 0$ 矢量控制方法,其在 d - q 轴的电压方程为^[15]:

$$\begin{cases} u_d = L_d \dot{i}_d + R_s i_d - \omega_r L_q i_q \\ u_q = L_q \dot{i}_q + R_s i_q + \omega_r \Psi_f + \omega_r L_d i_d \end{cases} \quad (4)$$

转矩方程为:

$$T_m = \frac{3}{2} P_N \Psi_f i_q \quad (5)$$

式中, i_d 、 i_q 、 u_d 、 u_q 分别为定子在 d - q 坐标系下电流与电压; L_d 、 L_q 为定子 d - q 轴电感; ω_r 为同步转速; R_s 为定子电阻; Ψ_f 为转子磁链; T_m 为电机输出转矩; P_N 为电机极对数. $i_d \equiv 0$ 控制仅实现了电流静态解耦,本文采用电流反馈动态解耦控制.令: $u_D = u_d + \omega_r L_q i_q$, $u_Q = u_q - \omega_r \Psi_f - \omega_r L_d i_d$,从而消去电压方程中的耦合项:

$$\begin{cases} u_D = L_d \dot{i}_d + R_s i_d \\ u_Q = L_q \dot{i}_q + R_s i_q \end{cases} \quad (6)$$

1.3 二自由度车辆模型

本文采用2自由度车辆模型,其侧向动力学模型如图1所示.

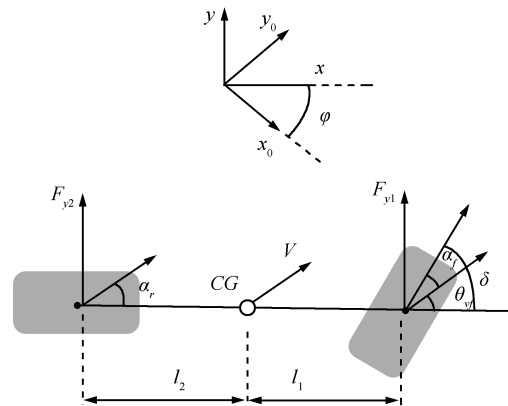


图1 车辆侧向动力学模型

Fig. 1 Vehicle lateral dynamics model

忽略道路倾角,运用牛顿第二定律在 y 轴方向^[3]:

$$m(\ddot{y} + V_x \dot{\phi}) = F_{y1} + F_{y2} \quad (7)$$

Z 轴力矩平衡:

$$I_Z \ddot{\phi} = l_1 F_{y1} - l_2 F_{y2} \quad (8)$$

向盘无法回到中位;车速越低,转向盘回正残留角越大,越需要主动参与回正.

$\sigma_d(t)$ 为外界对前轮的周期性干扰,源于路面周期性的横向变形^[18]:

$$\sigma_d(t) = \kappa \cos(\omega_d t) \quad (15)$$

式中, κ 为干扰幅度大小; ω_d 为干扰周期.

3 系统观测器设计

3.1 路面附着系数估计

路面附着系数反应了轮胎与路面的接触信息,如图 2 所示.

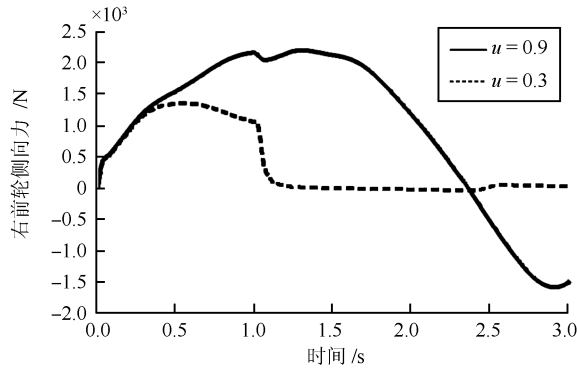


图 2 不同路面附着系数下前轮侧向力情况

Fig. 2 The front wheel lateral force under different road adhesion coefficients

当路况较差时,驾驶员往往很难准确操纵车辆,转向时容易造成车辆失控.针对路面附着系数的估计,目前研究多基于车辆制动工况,利用制动轮缸压力等间接量来估算路面附着系数^[19],然而对于车辆的转向工况,其横摆稳定性与转向手感都受到路面附着情况的影响.本文根据 2 自由度车辆模型,将 α_f 、 μ 作为非线性观测器的状态,进行协同估计.由式 (7)~(9) 可得: $\dot{\alpha}_f = \dot{\delta} + \gamma - \lambda F_{y1} - \eta F_{y2}$, 其中: $\lambda = \frac{1}{mV_x} + \frac{l_1^2}{I_z V_x}$, $\eta = \frac{1}{mV_x} - \frac{l_1 l_2}{I_z V_x}$.

假设路面未发生突变时: $\dot{\mu} = 0$, 导出非线性观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\alpha}}_f = \dot{\delta} + \gamma - \lambda F_{y1} \hat{G} - \eta \hat{F}_{y2} + L_1(ma_y - (\hat{F}_{y1} + \hat{F}_{y2})) + L_2(T_{sat} - \hat{T}_{sat}) \\ \dot{\hat{\mu}} = L_3(ma_y - (\hat{F}_{y1} + \hat{F}_{y2})) + L_4(T_{sat} - \hat{T}_{sat}) \end{cases} \quad (16)$$

式中, L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 为观测器反馈增益参数. 将上式改写成矩阵的形式:

$$\dot{\hat{z}} = F(\hat{z}, u) + L(\hat{z}, u)(H(z, u) - H(\hat{z}, u)) \quad (17)$$

$$\text{式中, } \hat{z} = [\hat{\alpha}_f, \hat{\mu}]^T, L(\hat{z}, u) = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ L_3 & L_4 \end{bmatrix},$$

$$F(\hat{z}, u) = \begin{bmatrix} f(\hat{\alpha}_f, \hat{\mu}, u) \\ 0 \\ \dot{\delta} + \gamma - \lambda \hat{F}_{y1} - \eta \hat{F}_{y2} \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$H(\hat{z}, u) = \begin{bmatrix} h_1(\hat{\alpha}_f, \hat{\mu}, u) \\ h_2(\hat{\alpha}_f, \hat{\mu}, u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{F}_{y1} + \hat{F}_{y2} \\ \hat{T}_{sat} \end{bmatrix}$$

根据 Lyapunov 稳定性条件,在 Lyapunov 稳定区间内计算选取适当的观测器增益矩阵 L ^[20],具体如下:

$$\begin{aligned} L_1 &= \left(k_1 \frac{\partial h_1}{\partial \alpha_f} + \frac{\partial f}{\partial \alpha_f} \middle/ \frac{\partial h_1}{\partial \alpha_f} \right) \bigg|_{\substack{\alpha_f = \hat{\alpha}_f \\ \mu = \hat{\mu}}} \\ L_2 &= k_2 \left(\frac{\partial h_2}{\partial \alpha_f} \right) \bigg|_{\substack{\alpha_f = \hat{\alpha}_f \\ \mu = \hat{\mu}}} \\ L_3 &= k_3 \left(\frac{\partial h_1}{\partial \mu} \right) \bigg|_{\substack{\alpha_f = \hat{\alpha}_f \\ \mu = \hat{\mu}}} \\ L_4 &= k_4 \left(\frac{\partial h_2}{\partial \mu} \right) \bigg|_{\substack{\alpha_f = \hat{\alpha}_f \\ \mu = \hat{\mu}}} \end{aligned}$$

3.2 未知输入观测器设计

由式 (10) 可知,方向盘输入转矩信号 T_d 为系统未知输入信号^[21],此时采用未知输入观测器进行状态和未知输入估计.本文利用辅助输出的思想,根据辅助输出及其导数的估计值构建降维观测器来估算未知输入状态.

由文献 [22–23] 计算系统输出 Y 关于未知输入 T_d 的相关度 $r_1 = 3, r_2 = 4$, 则取 $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 4$ 时,系统满足观测器匹配条件,即 $\text{rank}(CF) = \text{rank}(F)$. 考虑带有辅助输出的新系统:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu_1 + Fu_2 \\ y_a = C_a X \end{cases} \quad (18)$$

式中,

$$\begin{aligned} C_a &= \begin{bmatrix} c_1 & c_1 A & c_1 A^2 & c_2 & c_2 A & c_2 A^2 & c_2 A^3 \end{bmatrix}^T \\ y_a &= C_a X = \begin{bmatrix} y_1 & y_{1,2} & y_{1,3} & y_2 & y_{2,2} & y_{2,3} & y_{2,4} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

考虑 $\text{rank}(F) = 1$, 构建非奇异矩阵: $T = \begin{bmatrix} F & O \end{bmatrix}$, 令 $X = TZ = T \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \end{bmatrix}^T$, 式 (18)

变换如下:

$$\begin{cases} \dot{Z} = \bar{A}Z + \bar{B}u_1 + \bar{F}u_2 \\ y_a = \bar{C}_a Z \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\bar{A} = T^{-1}AT$, $\bar{B} = T^{-1}B$, $\bar{F} = T^{-1}F$, $\bar{C}_a = C_a T$. 易验证 $\text{rank}(C_a F) = \text{rank}(F)$ 满足观测条件, 给出高增益观测器设计如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{y}}_{v1,1} \\ \dot{\hat{y}}_{v1,2} \\ \dot{\hat{y}}_{v1,3} \\ \dot{\hat{y}}_{v1,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{y}_{v1,1} \\ \hat{y}_{v1,2} \\ \hat{y}_{v1,3} \\ \hat{y}_{v1,4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{1,1}/\chi \\ \beta_{1,2}/\chi^2 \\ \beta_{1,3}/\chi^3 \\ \beta_{1,4}/\chi^4 \end{bmatrix} (y_1 - \hat{y}_{v1,1})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{y}}_{v2,1} \\ \dot{\hat{y}}_{v2,2} \\ \dot{\hat{y}}_{v2,3} \\ \dot{\hat{y}}_{v2,4} \\ \dot{\hat{y}}_{v2,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{y}_{v2,1} \\ \hat{y}_{v2,2} \\ \hat{y}_{v2,3} \\ \hat{y}_{v2,4} \\ \hat{y}_{v2,5} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{2,1}/\chi \\ \beta_{2,2}/\chi^2 \\ \beta_{2,3}/\chi^3 \\ \beta_{2,4}/\chi^4 \\ \beta_{2,5}/\chi^5 \end{bmatrix} (y_2 - \hat{y}_{v2,1})$$

式中, $\beta_i = [\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,\gamma_i}, \beta_{i,\gamma_i+1}]$ ($i = 1, 2$) 是 Hurwitz 矩阵, $0 < \chi < 1$, 取合适的 β_i 、 χ 得出降维观测器为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}}_2 = (\bar{A}_2 - \bar{L}_a \bar{C}_a) \hat{Z}_2 + \bar{B}_2 u_1 + (G_2 + \bar{L}_a H_1) y_a \\ \hat{X} = T \begin{bmatrix} H_2 y_a - \bar{L}_a \bar{C}_a O \hat{Z}_2 \\ \hat{Z}_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\bar{A}_2 = \bar{A}_{22} - \bar{A}_{21} H_2 C_a O$, $G_2 = \bar{A}_{21} H_2$, $H_1 C_a F = 0$, $H_2 C_a F = 1$, 选择 $\bar{L}_a$ 使得 $A_2 - \bar{L}_a \bar{C}_a$ 的极点配置在左半复平面内. 设定 $\hat{Z}_2$ 的初值, 最后进行未知输入重构, 即完成对未知输入 u_2 的估计:

$$\hat{u}_2 = H_2 \dot{\hat{y}}_a + F_1 y_a + F_2 Z_2 + F_3 u_1 \quad (21)$$

式中, $F_1 = -H_2 C_a O \bar{A}_{21} H_2 - \bar{A}_{11} H_2$, $F_2 = \bar{A}_{11} H_2 C_a O - H_2 C_a O \bar{A}_{22} + H_2 C_a O \bar{A}_{21} H_2 C_a O - \bar{A}_{12}$, $F_3 = -H_2 C_a O \bar{B}_2 - \bar{B}_1$.

4 EPS 系统控制

4.1 助力-回正特性

本文根据 T_d 、 T_r 和 V 的关系, 采用二输入一输出的模糊控制器实现助力-回正特性曲面的设计, 如图 3 所示.

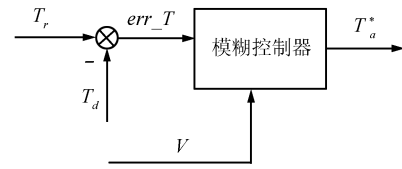


图 3 EPS 系统助力-回正控制框图

Fig. 3 Dynamic-returnability control block diagram of EPS system

该设计将式 (21) 估计的方向盘转矩值 T_d 、车速 V 与 EPS 系统计算得出的阻力矩 T_r 作为量测信号, 一旦 UIO 估计 $T_d < \varepsilon$ (ε 为较小的数), 则 PMSM 不工作. 该模糊控制器第一个输入量为 $err_T = T_r - T_d$, 即系统实际所需助力矩, 根据模糊规则, 将 err_T 与 V 经由模糊控制器模糊化、模糊推理、反模糊化得到系统目标助力矩 T_a^* .

设定输入变量 err_T 的基本论域为 $[-30, 30]$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, V 的基本论域是 $[0, 100]$, 车速 V 采用 11 级描述: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, 输出量 T_a^* 的基本论域为 $[-30, 30]$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 建立 err_T 、 V 与 T_a^* 的三角形隶属度函数; 根据 EPS 实际操作经验, 制定模糊规则 (表 1). 如: if $V = 0$ and $err_T = PB$, then $T_a^* = NB$, 可以理解为: 车辆在原地转向时, 方向盘输入转矩较小, 此时 PMSM 主动输出反向最大转矩辅助方向盘快速回到中间位置.

4.2 状态反馈最优控制

由系统状态方程 (10) 计算可知, $\sum (A, B, C)$ 可控, 则系统反馈矩阵为: $K = R^{-1} B^T P$, 其中 Q 、 R 为正定对称矩阵, P 为下述矩阵黎卡提代数方程的正定对称解阵: $PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$. 若存在 K^* 使得 $J(K^*, X_0) \rightarrow \min J$, 则 K^* 为系统最优反馈矩阵. EPS 系统中, 控制的核心是使电机辅助力矩实时跟随系统所需助力矩, 因此确定系

统性能指标函数为:

$$J = \int_0^{\infty} Q(i_q^* - i_q)^2 dt$$

(22)

设定 $Q = 1$, 求解得矩阵 P , 即可得出 EPS 系统最优控制为 $u^* = -K^*X^*$. 最优性能值为: $J^* = X_0^T P X_0, \forall X_0 \neq 0$.

表 1 T_m^* 的模糊规则表
Table 1 T_m^* fuzzy control rules

V	err_T						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
0	ZO	ZO	ZO	PM	PB	PB	NB
1	ZO	ZO	ZO	PM	PB	PB	NB
2	ZO	ZO	ZO	PM	PM	PB	NB
3	NS	ZO	ZO	PS	PM	PB	NB
4	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	NM
5	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	NM
6	NM	NM	NS	PS	PS	PM	NM
7	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	NM
8	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	NS
9	NB	NB	NM	ZO	PS	PS	NS
10	NB	NB	NM	ZO	ZO	PS	NS

5 系统仿真

5.1 仿真环境搭建

为了验证 EPS 系统设计的合理性, 在 AMESim 中搭建了 EPS 机械系统; 在 Matlab/Simulink 里搭建 EPS 控制策略. 通过 Simulink 中 S 函数作为接口实现联合仿真. EPS 整体控制策略如图 4 所示.

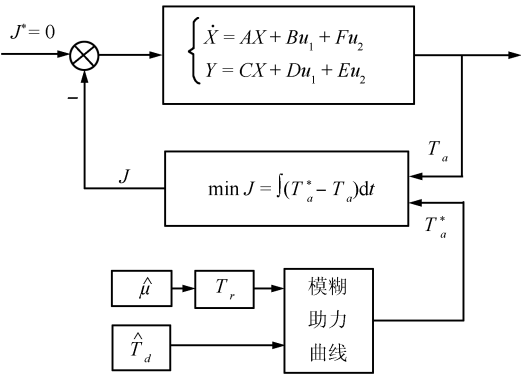


图 4 EPS 系统控制框
Fig. 4 Control diagram of EPS system

5.2 仿真结果分析

设定 $V = 36 \text{ km/h}$, 采用正弦信号模拟方向盘输入转角, UIO 估计方向盘转矩值如图 5 所示. UIO 工作初期, 方向盘转矩 T_d 的估计误差在 $[-2, 6]$, 在 $t = 0.8 \text{ s}$ 后, 估计误差减小, 接近实际值.

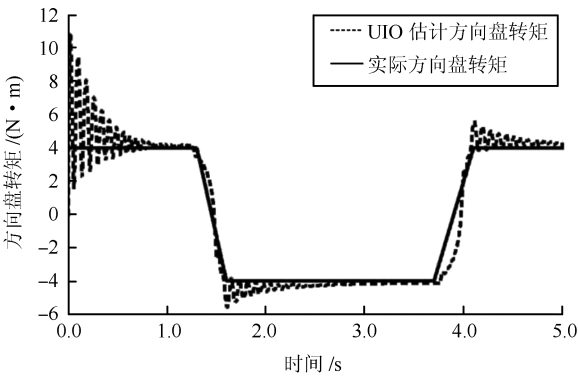


图 5 方向盘转矩估计情况
Fig. 5 Steering wheel torque estimation

图 6 为非线性观测器对当前路面附着情况的估算, 可以看出, 该算法能够较为准确地估计路面附着系数. 由于本文设计的估计算法均属于开环估算, 无反馈与自调整能力, 因此仿真出现了波动, 但是基本达到了估算要求.

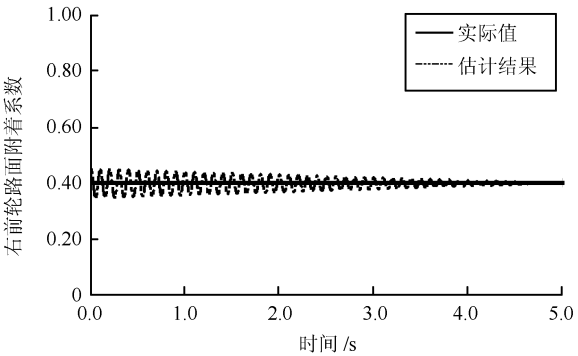


图 6 $\mu = 0.3$ 时的估计情况
Fig. 6 Estimate coefficient of road adhesion when $\mu = 0.3$

图 7 显示在不同路面上的 EPS 系统操作转矩变化, 当 $\mu = 0.3$ 时, 方向盘转角增大到一定程度后方向盘转矩会明显降低以提高路感; 当 $\mu = 0.9$ 时, 由于高附着路面自回正力矩较大, 路感明显, 因此操作转矩基本与转角成正比关系.

图 8 可以看出在不同路面下 EPS 系统助力电机的输出力矩也不同, 从而验证了该控制方法的有效性.

汽车转向操作稳定性试验中, 方向盘输入正弦信号模拟车辆蛇形试验, 如图 9 所示, 当方向盘输入

转矩不变时, 车速越高, 电机助力矩越小, 原地转向时助力矩最大, 基本达到轻便性要求。

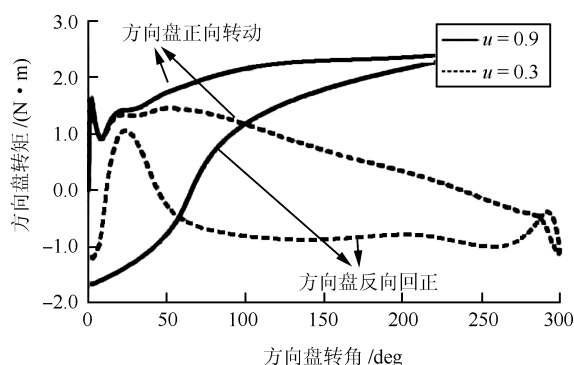


图 7 不同路面下方向盘操作转矩

Fig. 7 The steering wheel torque operation under different pavements

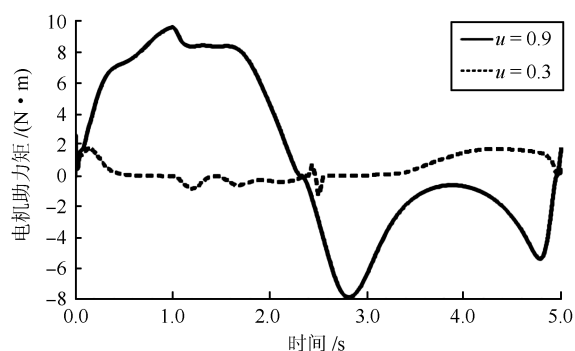


图 8 不同路面下电机助力矩

Fig. 8 Motor assist torque under different pavements

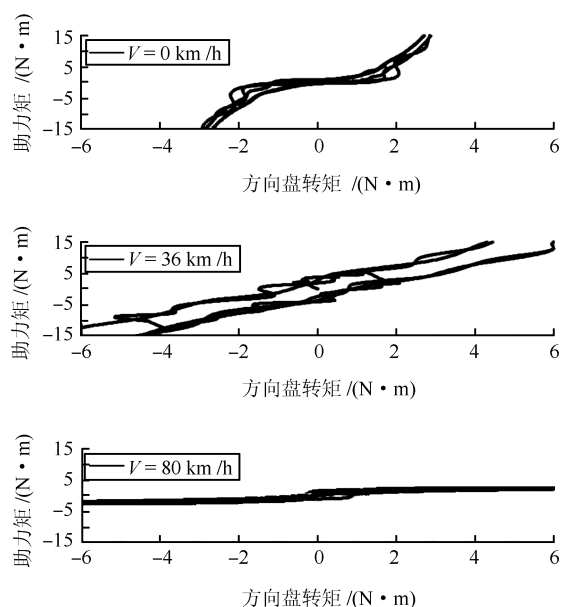


图 9 不同车速下电机助力情况

Fig. 9 Assist torques under different speeds

图 10 为 EPS 系统在状态反馈最优控制下 PMSM q 轴实际助力电流与目标值的正弦响应曲线, 可以看出: 最优状态下 EPS 系统具有好的抗干扰能力, 使电机闭环 q 轴电流误差达到最小。

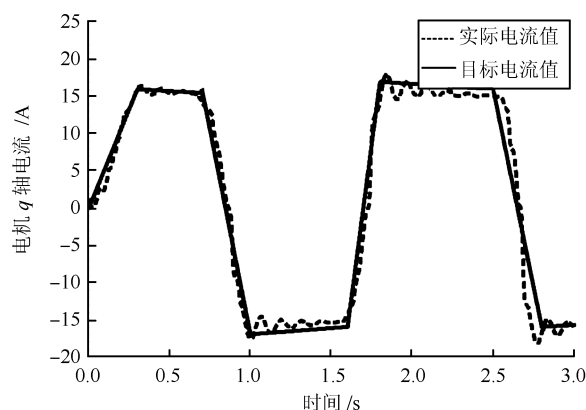


图 10 电机 i_q 正弦响应曲线

Fig. 10 Sine response curves of i_q

如图 11 所示, 车辆以 $V = 36 \text{ km/h}$ 、 $\mu = 0.3$ 的路面上行驶, 在 $t = 1 \text{ s}$ 松开方向盘, 未加回正控制时转向盘残留角为 25° , 且回正时间较长; 系统引入助力-回正控制后, 转向盘残留角基本为 0° , 且回正时间缩短了 1 s , 回正迅速, 明显改善了系统的回正性能。

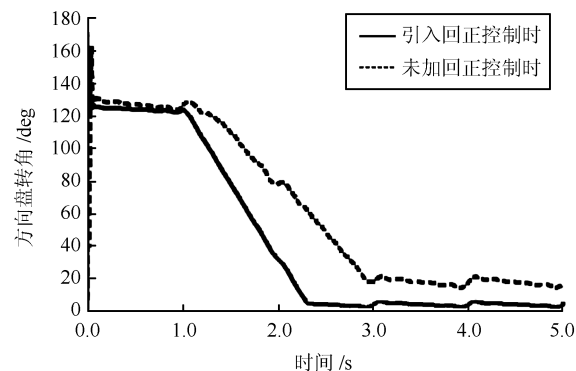


图 11 EPS 系统回正性能

Fig. 11 Return-to-center performance of EPS system

6 结论

结合 2 自由度车辆动力学建立了 EPS 系统机械模型, 针对不同路面采用非线性观测器对路面附着系数进行估算, 设计了未知输入观测器观测转向盘转矩输入信号, 省去了转矩传感器, 从而实现了 EPS 系统无传感器技术; 接着将 PMSM 轴电流闭环误差最小作为性能指标函数, 设计了状态反馈最优控制器, 最后仿真验证该 EPS 系统控制效果。

1) 量化了 EPS 系统阻力矩, 从而改善了车辆在不同路面上的转向手感. 车辆转向时, EPS 系统控制策略根据当前路面附着情况来确定系统的力矩分配情况, 不同车速、路面上, 系统助力完全不同.

2) 提高了车辆转向时的回正性能. 提出的助力-回正控制策略明显缩短了方向盘回正所需时间, 且回正残留角基本为 0° .

References

- Chen X, Yang T B, Chen X Q, Zhou K M. A generic model-based advanced control of electric power-assisted steering systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(6): 1289–1300
- Jin H. Characteristic analysis of interior permanent-magnet synchronous motor in electrohydraulic power steering systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(6): 2316–2323
- Zhao Wan-Zhong, Shi Guo-Biao, Lin Yi, Nie Hong. Tracking performance of electric power steering based on the mixed H_2/H_∞ strategy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **24**(4): 584–590
- Du Feng, Wei Lang, Zhao Jian-You. Design of variable structure controller for active steering vehicle. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, **9**(1): 35–39
(杜峰, 魏朗, 赵建有. 车辆主动转向的变结构控制器设计. 交通运输工程学报, 2009, **9**(1): 35–39)
- Marouf A, Djemai M, Sentouh C, Pudlo P. A new control strategy of an electric-power-assisted steering system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(8): 3574–3589
- Hu Li-Sheng, Shao Hui-He, Sun You-Xian. Robust sampled-data control for nonlinear uncertain systems. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(6): 835–839
(胡立生, 邵惠鹤, 孙优贤. 非线性系统的鲁棒采样控制. 自动化学报, 2000, **26**(6): 835–839)
- Veluvolu K C, Soh Y C. High-gain observers with sliding mode for state and unknown input estimations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(9): 3386–3393
- Veluvolu K C, Soh Y C. Multiple sliding mode observers and unknown input estimations for Lipschitz nonlinear systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, **21**(11): 1322–1340
- Chen Zeng-Qiang, Sun Ming-Wei, Yang Rui-Guang. On the stability of linear active disturbance rejection control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 574–580
(陈增强, 孙明伟, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究. 自动化学报, 2013, **39**(5): 574–580)
- Mahmoud M S, Emzir M F. Unknown-input estimator-based controller design of electric power-assisted steering system. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(16): 2485–2492
- Zhao Lin-Feng, Chen Wu-Wei, Qin Wei-Hua, Yang Jun. Electric power steering on low friction coefficient road. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(2): 109–114
(赵林峰, 陈无畏, 秦炜华, 杨军. 低附着路面条件下 EPS 控制策略. 机械工程学报, 2011, **47**(2): 109–114)
- Zhao L H, Liu Z Y, Chen H. Design of a nonlinear observer for vehicle velocity estimation and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, **19**(3): 664–672
- Chen Y, Wang J M. Vehicle-longitudinal-motion-independent real-time tire-road friction coefficient estimation. In: Proceeding of the 49th Conference on Decision and Control. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010. 2910–2915
- Mehrabi N, Azad N L, Mcphee J. Optimal disturbance rejection control design for electric power steering systems. In: Proceeding of the 50th Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011. 6584–6589
- Zhou Hua-Wei, Wen Xu-Hui, Zhao Feng, Zhang Jian. Decoupled current control of permanent magnet synchronous motors drives with sliding mode control strategy based on internal model. *Proceeding of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **32**(15): 91–99
(周华伟, 温旭辉, 赵峰, 张剑. 基于内模的永磁同步电机滑模电流解耦控制. 中国电机工程学报, 2012, **32**(15): 91–99)
- Ahmadi J, Sedigh A K, Kabgarian M. Adaptive vehicle lateral-plane motion control using optimal tire friction forces with saturation limits consideration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, **58**(8): 4098–4107
- Marouf A, Djemai M, Sentouh C, Pudlo P. Sensorless control of electric power assisted steering system. In: Proceeding of 20th Mediterranean Conference on Control & Automaton. Barcelona, Spain: IEEE, 2012. 909–914
- Shi Guo-Biao, Shen Rong-Wei, Lin Yi. Modeling and simulation of electric power steering system. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2007, **37**(1): 31–36
(施国标, 申荣卫, 林逸. 电动助力转向系统的建模与仿真技术. 吉林大学学报, 2007, **37**(1): 31–36)

- 19 Yang Cai, Li Liang, Song Jian, Li Hong-Zhi. Road friction coefficient estimation algorithm based on tire force observer. *China Mechanical Engineering*, 2009, **20**(7): 873–876
(杨财, 李亮, 宋健, 李红志. 基于轮胎力观测器的路面附着系数识别算法. 中国机械工程, 2009, **20**(7): 873–876)
- 20 Ahn C, Peng H, Tseng H E. Robust estimation of road friction coefficient. In: *Proceeding of the American Control Conference on O'Farrell Street*. San Francisco, America: IEEE, 2011. 3948–3953
- 21 Nehaoua L, Djemai M, Pudlo P. Virtual prototyping of an electric power steering simulator. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, **14**(1): 274–283
- 22 Han Dong, Zhu Fang-Lai. Simultaneous estimation of states and unknown inputs for linear systems based on auxiliary outputs. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(6): 932–943
(韩冬, 朱芳来. 基于辅助输出的线性系统状态和未知输入同时估计方法. 自动化学报, 2012, **38**(6): 932–943)
- 23 Hu Zhi-Kun, Sun Yan, Jiang Bin, He Jing, Zhang Chang-Fan. An optimal unknown input observer based fault diagnosis method. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1225–1230
(胡志坤, 孙岩, 姜斌, 何静, 张昌凡. 一种基于最优未知输入观测器的故障诊断方法. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1225–1230)



郑太雄 重庆邮电大学教授. 主要研究方向为汽车电子.

E-mail: zhengtx@cqupt.edu.cn

(ZHENG Tai-Xiong Professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest is automotive electronics.)

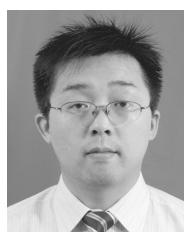


周花 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为汽车电动助力转向系统.

E-mail: zhouzhouflower@163.com

(ZHOU Hua Master student at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her research interest is electric power steering (EPS)

system of vehicle.)



李永福 重庆邮电大学副教授. 主要研究方向为汽车电子、智能交通和控制. 本文通信作者. E-mail: laf1212@163.com

(LI Yong-Fu Associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers automotive electronics, intelligent transportation and control. Corresponding author of this paper.)