

P-ECHPS 自适应非奇异快速终端滑模控制器设计

江浩斌¹ 龚晓庆¹ 耿国庆¹ 陈龙² 唐斌² 王爱仙³

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013;

3. 江苏超力电器有限公司, 丹阳 212300)

摘要: 以永磁转差离合器式电控液助力转向系统(P-ECHPS)为研究对象,建立了其关键部件永磁转差离合器(PMSC)调速模型及P-ECHPS各子系统模型。针对P-ECHPS系统在转向过程中存在多种不确定性因素且要求响应速度快的特点,采用非奇异快速终端滑模与自适应控制相结合的方法,对PMSC进行调速控制,进而实现对P-ECHPS系统助力的控制。仿真分析结果表明,该方法能确保PMSC输出转速快速地跟踪理想转速,收敛速度比滑模控制和非奇异终端滑模控制分别提高了近82.9%和66.7%,具有很强的鲁棒性,较好地实现了可变助力特性。

关键词: 永磁转差离合器; 电控液助力转向; 调速模型; 非奇异快速终端滑模; 可变助力特性

中图分类号: U463.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0374-08

Design of Adaptive Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Controller for P-ECHPS

Jiang Haobin¹ Gong Xiaoqing¹ Geng Guoqing¹ Chen Long² Tang Bin² Wang Aixian³

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

2. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

3. Jiangsu Chaoli Electric Appliance Co., Ltd., Danyang 212300, China)

Abstract: The permanent magnet slip clutch-electronically controlled hydraulic power steering system which is referred as P-ECHPS was proposed. The speed control model of permanent magnet slip clutch (PMSC) which is the key transmission part of P-ECHPS was established and all subsystems of P-ECHPS including of mechanical systems, hydraulic systems and three degrees of freedom steering dynamics system were also established in Matlab/Simulink. The variable assist characteristic curves were designed by analyzing the requirements of steering system under different speeds. According to the variable assist characteristic curves and the model of steering pump, the ideal speed of steering pump was obtained. For P-ECHPS containing various uncertain factors during steering process, such as parameter perturbation and external disturbance, and requirement of fast response, the adaptive nonsingular fast terminal sliding mode was used to control the speed of PMSC. Further it can realize the indirect control of P-ECHPS. The controller was designed according to the adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control strategy. Through simulation, the results show that adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control can ensure the output speed of PMSC track to the ideal speed quickly and has great robustness. The convergence rate of adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control respectively increased by about 82.9% and 66.7% than that of sliding mode control and nonsingular terminal sliding mode control. It can also realize variable assist characteristic accurately to meet the handling stability and energy efficiency.

Key words: permanent magnet slip clutch; electronically controlled hydraulic power steering; speed regulating model; nonsingular fast terminal sliding mode; variable assist characteristic

收稿日期: 2016-05-03 修回日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275211)、江苏省高校自然科学基金项目(14KJB580003)、江苏大学高级人才科研启动基金项目(15JDG093)、中国博士后科学基金项目(2016M590417)和江苏省科技成果转化专项基金项目(BR2015168)

作者简介: 江浩斌(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆系统动力学与电控技术研究, E-mail: jianghb@ujs.edu.cn

引言

重型车辆普遍采用的传统液压助力转向系统 (Hydraulic power steering, HPS), 其助力特性不能随速可变, 且在汽车行驶过程中, 不管汽车是否转向, 转向泵始终处于高速运转状态, 造成能源浪费。针对 HPS 上述缺点, 本文提出一种永磁转差离合器式电控液压助力转向系统 (Permanent magnet slip clutch-electronically controlled hydraulic power steering, P-ECHPS), P-ECHPS 系统控制的关键在于永磁转差离合器 (Permanent magnet slip clutch, PMSC) 的调速控制。由于 P-ECHPS 系统中具有多变量、非线性特点, 且存在着参数摄动和外界干扰等各种不确定因素, 同时对系统响应敏捷性要求高, 常规的 PID 控制很难取得满意的控制效果, 因此针对 P-ECHPS 系统的特点和实际要求, 研究其控制问题是非常有必要的。

滑模变结构控制 (Sliding mode control, SMC) 是一种非线性控制, 具有对参数变化及扰动不灵敏、鲁棒性强、物理实现简单等优点^[1], 且在电机控制中运用较多, 因此适用于 P-ECHPS 系统控制。近年来, 终端滑模 (Terminal sliding mode, TSM) 因在滑模中引入非线性项, 提高了系统收敛速度, 使系统状态可在有限时间内收敛到预定轨迹, 而成为研究热点^[2]。但是 TSM 存在奇异性问题^[3-5], 因此一些学者提出非奇异终端滑模 (Nonsingular terminal sliding mode, NTSM) 控制算法^[6], 用于带有参数不确定和外部扰动的二阶非线性动态系统, 克服了奇异性问题。NTSM 只能保证在滑模面上有限时间收敛, 在系统状态远离平衡点时, 其收敛速度较慢, 动态特性变差, 不能实现全局快速收敛^[7-8], 因此近年来出现了非奇异快速终端滑模 (Nonsingular fast terminal sliding mode, NFTSM) 控制方法^[9-12]。

为了进一步提高 P-ECHPS 控制系统的性能, 保证全局快速收敛, 本文将自适应控制与 NFTSM 相结合, 提出自适应 NFTSM 控制方法, 通过仿真分析, 验证该控制方法的有效性。

1 P-ECHPS 系统组成

图 1 为 P-ECHPS 组成示意图。它依托于传统的 HPS, 并在发动机和转向泵之间安装调速传动机构 PMSC, PMSC 输入与输出端分别与发动机和转向泵相联接。车辆行驶过程中, 电子控制单元 (ECU) 根据传感器获得的车速、发动机转速、转向盘转角转矩和转向泵转速信号, 计算出 PMSC 外调速控制电路中占空比, 从而控制 PMSC 内转子转速, 以此间接

控制转向泵的转速, 使转向泵的输出流量在高效区内变化, 实现可变助力特性, 满足转向助力与路感的要求, 同时又避免转向泵输出流量过大而产生溢流损耗, 降低转向系统的能耗。

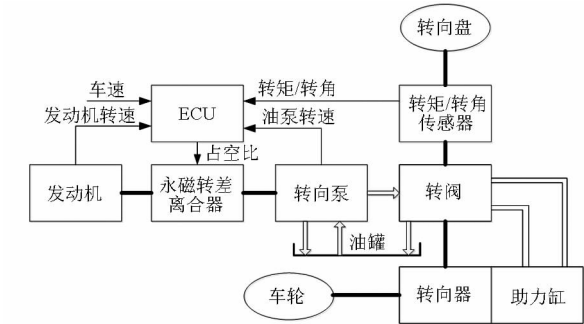


图 1 P-ECHPS 系统组成示意图
Fig. 1 Composition diagram of P-ECHPS

2 P-ECHPS 系统建模

2.1 PMSC 调速模型

PMSC 的机械结构如图 2 所示, 包括外转子、内转子和外调速控制电路, 其中外转子内嵌三相绕组, 内转子表面为永磁体。依靠内外转子之间产生的电磁转矩带动内转子和转向泵一起旋转。

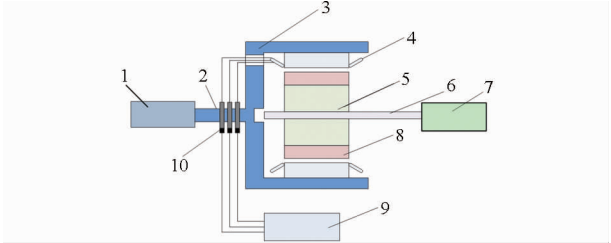


图 2 PMSC 结构图
Fig. 2 Structure diagram of PMSC

1. 发动机 2. 主动轴 3. 外转子 4. 三相绕组 5. 内转子
6. 从动轴 7. 转向泵 8. 永磁体 9. 外控制电路 10. 滑环与电刷

当车辆在不同工况转向时, 所需的助力是不同的, 即转向泵转速不同, 而 PMSC 本体的机械特性不一定能使转向泵达到每种工况下的期望转速, 所以需要采用外控制电路进行调速。本文设计了如图 3 所示的基于 IGBT 的 Boost 调速电路, 通过调整 IGBT 占空比的大小, 使绕组电流 I_d 产生变化, 从而改变

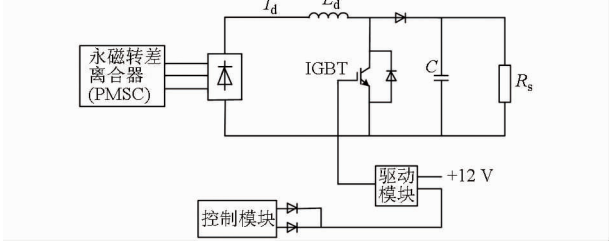


图 3 基于 IGBT 的 Boost 调速电路
Fig. 3 Boost speed control circuit based on IGBT

PMSC 内转子的输出转矩,继而改变转向泵转速,使其达到各工况下的期望转速,实现随速可变的助力特性。

采用状态空间平均法^[13]和直流斩波调速原理,建立该调速电路的数学模型

$$\begin{cases} U_d - (1 - D)U_c = L_d \dot{I}_d + RI_d \\ U_d = k(\omega_1 - \omega_2) \\ U_c = \sqrt{\frac{L_d}{C}}I_d \\ T_e = C_m I_d \\ T_e - T_L - F_2\omega_2 = J_2 \dot{\omega}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 U_d ——感应电动势
 U_c ——电容端电压
 D ——占空比 L_d ——电感
 R ——外转子三相绕组电阻
 k ——感应电动势系数
 C ——电容 T_e ——电磁转矩
 $\omega_1、\omega_2$ ——外、内转子的机械角速度
 C_m ——转矩系数 T_L ——负载转矩
 F_2 ——内转子阻尼系数
 J_2 ——内转子的转动惯量

PMSC 调速模型参数为 $L_d = 3 \times 10^{-4} \text{ H}$, $R = 0.50 \text{ }\Omega$, $k = 0.82$, $C = 4 \text{ }\mu\text{F}$, $F_2 = 0.02 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$, $J_2 = 0.008 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $C_m = 1.87$ 。

2.2 机械子系统模型

P-ECHPS 中机械子系统主要由转向盘-转向轴、转向螺杆-转向螺母、转向螺母-摇臂轴齿扇、摇臂轴齿扇-摇臂轴模型组成^[14],各模型分别为

$$\begin{cases} J_s \ddot{\theta}_d + B_c \dot{\theta}_d + K_c(\theta_d - \theta_{lg}) = T_d \\ J_{lg} \ddot{\theta}_{lg} + B_{lg} \dot{\theta}_{lg} = K_c(\theta_d - \theta_{lg}) - FL \\ M_{lm} \ddot{X}_{lm} + B_{lm} \dot{X}_{lm} = F + F_z - F_{cs} \\ J_{cs} \ddot{\theta}_{cs} + B_{cs} \dot{\theta}_{cs} = F_{cs} r_{cs} - T_p \end{cases} \quad (2)$$

式中 J_s ——转向盘-转向管柱等效转动惯量
 θ_d ——转向盘转角
 B_c ——粘性阻尼系数
 K_c ——扭杆刚度
 θ_{lg} ——转向螺杆转角
 T_d ——驾驶员输入转矩
 L ——螺杆力中心距
 J_{lg} ——转向螺杆等效转动惯量
 F ——转向螺杆轴向力
 B_{lg} ——转向螺杆-蜗轮粘性阻尼系数
 M_{lm} ——转向螺母质量
 θ_{cs} ——齿扇转角

B_{lm} ——助力油缸阻尼系数
 X_{lm} ——转向螺母位移
 F_z ——液压系统提供的助力
 F_{cs} ——摇臂轴齿扇上作用力
 J_{cs} ——齿扇等效转动惯量
 B_{cs} ——齿扇粘性阻尼系数
 r_{cs} ——齿扇节圆半径
 T_p ——转向阻力矩

2.3 液压子系统模型

P-ECHPS 中液压子系统主要由转阀、转向泵和助力油缸组成。转阀阀口通流面积影响液压系统提供的助力大小,其计算公式为

$$A_1 = \begin{cases} W_1 L_1 + W_2 L_2 - L_2 r \Delta\theta & (0 \leq \Delta\theta < W_2/r) \\ W_1 L_1 + W_2 L_2 - L_2 r \Delta\theta & (W_2/r \leq \Delta\theta \leq (W_1 + W_2)/r) \end{cases} \quad (3)$$

式中 W_1 ——阀口预开隙宽度
 W_2 ——短切口宽度
 L_1 ——短切口轴向长度
 L_2 ——阀口轴向长度
 r ——阀芯半径
 $\Delta\theta$ ——阀芯与阀套相对转角

由液压传动的基本知识可知,转向泵和助力油缸的数学模型可表示为

$$Q = n_p V_p \quad (4)$$

$$Q_L = A_p \dot{x}_p + C_i \Delta p \quad (5)$$

式中 Q ——转向泵输出流量
 n_p ——转向泵输入转速
 V_p ——转向泵排量
 Q_L ——转阀进入液压缸的流量
 A_p ——活塞有效面积
 x_p ——活塞位移 C_i ——泄漏系数
 Δp ——助力油缸两端压差

2.4 整车动力学模型

采用如图 4 所示的三自由度整车动力学模型,包括侧向、侧倾和横摆^[15-16],其数学模型为

$$\begin{cases} I_z \dot{w}_r - I_{xz} \ddot{\varphi} = 2aK_1 \delta_1 - 2bK_2 \delta_2 \\ mu(w_r + \dot{\beta}) + m_s h \ddot{\varphi} = 2K_1 \delta_1 + 2K_2 \delta_2 \\ I_x \ddot{\varphi} + m_s h u(w_r + \dot{\beta}) - I_{xz} \dot{w}_r = \\ \quad - (d_1 + d_2) \dot{\varphi} - (c_1 + c_2 - m_s hg) \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中 $I_x、I_z$ ——车辆绕 $x、z$ 轴的转动惯量
 w_r ——横摆角速度
 $m、m_s$ ——整车、簧载质量
 I_{xz} ——簧载质量绕 $z、x$ 轴的惯性积
 $K_1、K_2$ ——前、后轮侧偏刚度

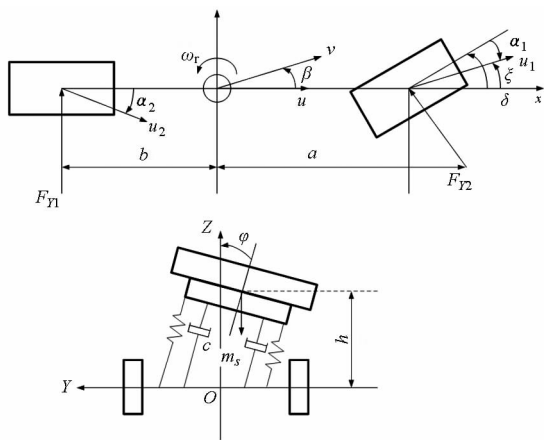


图 4 三自由度整车动力学模型

Fig. 4 Vehicle dynamics model with 3-DOF

- a, b ——质心到前、后轴距
- δ_1, δ_2 ——前、后轮侧偏角
- u ——车辆横向速度
- β ——质心侧偏角 h ——侧倾力臂
- φ ——车身侧倾角
- d_1, d_2 ——前、后悬架侧倾角阻尼系数
- c_1, c_2 ——前、后悬架侧倾角刚度

2.5 轮胎模型和转向阻力矩模型

轮胎建模过程中只考虑侧滑工况,此时轮胎侧偏刚度被认为是线性变化的,其数学模型为

$$\begin{cases} F_c = K_c \delta_1 \\ T_h = F_c d \end{cases} \tag{7}$$

式中 F_c ——轮胎侧偏力 d ——轮胎拖距
 T_h ——回正力矩

由几何关系可得,前轮的侧偏角计算公式为

$$\delta_1 = \beta + \frac{a}{u} w_r - \delta - E_1 \varphi \tag{8}$$

式中 E_1 ——前悬架侧倾转向系数
 δ ——前轮转角

转向系统的输入力矩大部分用于克服路面与转向轮相互作用产生的回正力矩^[17],忽略转向惯性力矩和转向摩擦力矩,可得到转向阻力矩 T_p ,计算公式为

$$T_p = K_1 d \left(\beta + \frac{a}{u} w_r - \delta - E_1 \varphi \right) \tag{9}$$

3 P-ECHPS 系统控制器设计

3.1 P-ECHPS 系统控制策略

P-ECHPS 系统要求响应快,具有多变量、非线性特点,且存在着参数摄动(如发动机转速波动)和外界干扰(如侧向风力,路面随机作用力)等各种不确定因素,而非奇异快速终端滑模(NFTSM)具有普通滑模控制对参数变化及扰动不灵敏、鲁棒性强、物理实现简单等优点,克服了普通线性滑模控制中系统状态不能在有限时间内收敛到零的缺点,且避免了终端滑模(TSM)存在的奇异性问题,同时又改善了非奇异终端滑模(NTSM)不具备全局快速收敛的特性,所以本文将自适应控制和 NFTSM 相结合,运用自适应 NFTSM 控制方法对 PMSC 进行调速控制,从而间接实现对 P-ECHPS 系统的控制。P-ECHPS 系统控制策略如图 5 所示。

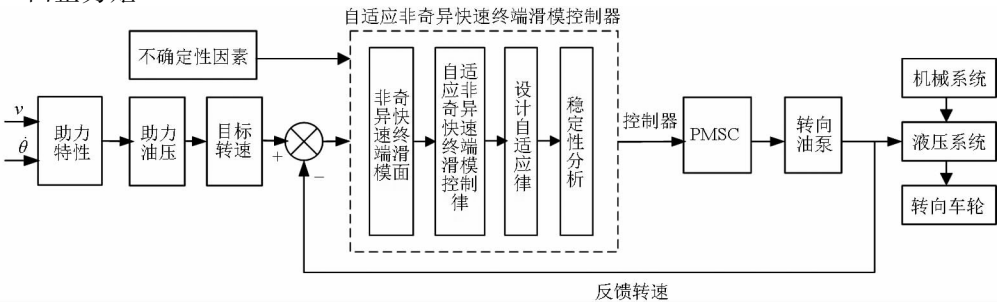


图 5 P-ECHPS 系统控制框图

Fig. 5 Control strategy diagram of P-ECHPS system

3.2 助力特性和理想转速

助力特性与整车的操纵性、安全性密切相关,理想的助力特性应随车速可变,具体要求为:车辆在原地或低速转向工况下,应提供较大的助力使得转向轻便,提高车辆操纵性。随着车速的增加,提供的助力应随之逐渐减小。特别是在高速工况下,应提供相对最小的助力使得驾驶者拥有出色的路感,保证行驶安全性。按此要求,选取了 6 个特征车速,设计了如图 6 所示的可变助力特性曲线。

P-ECHPS 控制系统控制参数为 PMSC 内转子

转速(等效于转向泵转速),控制目标是使转向泵达到预设的理想转速,转向泵理想转速计算过程如图 7 所示。

通过计算得出图 8 所示的转向泵理想转速。

3.3 自适应 NFTSM 控制器设计

3.3.1 转速误差状态方程

假设 ω_d 二阶连续可导,定义状态变量 $E = (e_1, e_2)$,可得

$$\begin{cases} e_1 = \omega_2 - \omega_d \\ e_2 = \dot{e}_1 = \dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_d \end{cases} \tag{10}$$

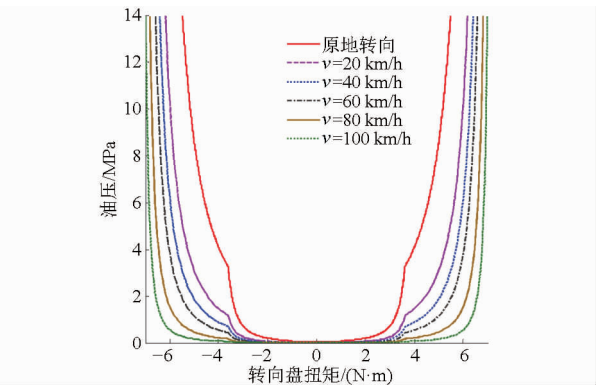


图6 不同特征车速下的可变助力特性曲线

Fig.6 Variable assist characteristic curve under different speeds

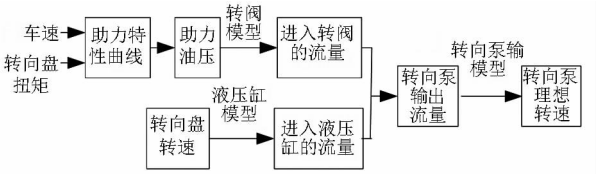


图7 转向泵理想转速计算过程框图

Fig.7 Ideal rotating speed calculation process of steering pump

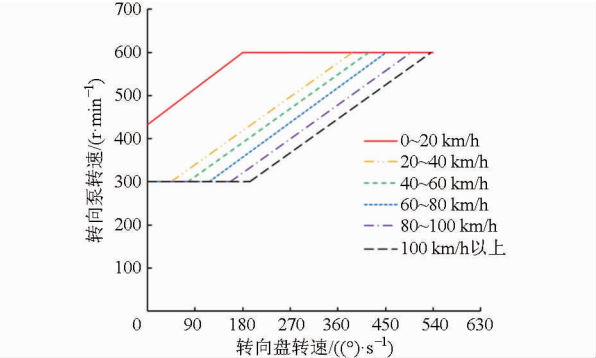


图8 转向泵理想转速曲线

Fig.8 Ideal rotating speed of steering pump

式中 ω_d ——转向泵理想转速
 e_1 ——转速误差
 e_2 ——转速误差导数

联立式(1),得到转速误差状态方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = f(x) + g(x)U + d(t) \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$f(x) = -\frac{C_m k + \left(\sqrt{\frac{L_d}{C}} + R\right) F_2}{L J_2} \omega_2 - \frac{\left(\sqrt{\frac{L_d}{C}} + R\right) J_2 + L_d F_2}{L_d J_2} \dot{\omega}_2 + \frac{C_m k \omega_1 - \left(\sqrt{\frac{L_d}{C}} + R\right) T_L - L_d \dot{T}_L}{L_d J_2}$$

$$d(t) = -\ddot{\omega}_d$$
$$g(x) = \frac{\sqrt{\frac{L_d}{C}} (J_2 \dot{\omega}_2 + T_L + F_2 \omega_2)}{L J_2}$$

式中 U ——控制量(占空比)

考虑系统存在的各种不确定性, $\dot{e}_2$ 又可表示为

$$\dot{e}_2 = (f(x) + \Delta f) + (g(x) + \Delta g)U + d(t) + \Delta d = f(x) + g(x)U + (\Delta f + \Delta gU + d(t) + \Delta d) \quad (12)$$

式中, Δf 、 Δg 、 Δd 代表各对应项的不确定性,它们都是有界。记 $h(t)$ 为总的不确定性和外界干扰,即有

$$h(t) = \Delta f + \Delta gU + d(t) + \Delta d \quad (13)$$

所以此时被控系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = f(x) + g(x)U + h(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $h(t)$ 是有界的,设定 $|h(t)| \leq l_h$, l_h 为干扰上界,其为大于零的常数。

3.3.2 自适应 NFTSM 控制律

选取 NFTSM 滑模面^[18]

$$S = e_1 + A e_1^{\frac{G}{H}} + B e_2^{\frac{p}{q}} \quad (15)$$

式中, A 、 $B > 0$, G 、 H 、 p 、 q 都为正奇数,且 $1 < p/q < 2$, $G/H > p/q$ 。

当系统状态远离平衡点时, e_1 高次项使得控制量变大,使系统收敛速度变快,收敛速度要高于普通 NTSM;当系统状态靠近平衡点时,此时 e_1 、 e_2 都趋近于0, e_1 高次项较小,可以忽略不计,收敛速度类似于 NTSM,所以 NFTSM 滑模面能保证控制系统全局快速收敛^[19]。

$\hat{l}_h$ 为 l_h 的估计,采用指数趋近律^[20],设计自适应 NFTSM 控制律

$$U = -\frac{1}{g(x)} \left[f(x) + \frac{1}{B} \frac{q}{p} e_2^{2-\frac{p}{q}} \left(1 + A \frac{G}{H} e_1^{\frac{G}{H}-1} \right) + (\hat{l}_h + \eta) \operatorname{sgn}(S) + k_3 S \right] \quad (16)$$

式中, η 、 k_3 都是大于零的常数。

选取自适应律为

$$\dot{\hat{l}}_h = nB \frac{p}{q} e_2^{\frac{p}{q}-1} |S| \quad (17)$$

式中 n ——可调整的参数

稳定性分析:

定义估计值误差

$$\tilde{l}_h = l_h - \hat{l}_h \quad (18)$$

取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2n} \tilde{l}_h^2 \quad (19)$$

对其求导得

$$\dot{V} = S \dot{S} - \frac{1}{n} \dot{\tilde{l}}_h \dot{\tilde{l}}_h =$$
$$S \left(e_2 + A \frac{G}{H} e_1^{\frac{c}{n}-1} e_2 + B \frac{p}{q} e_2^{\frac{p}{q}-1} e_2 \right) - \frac{\dot{\tilde{l}}_h \dot{\tilde{l}}_h}{n} =$$
$$SB \frac{p}{q} e_2^{\frac{p}{q}-1} \left[-k_3 S + (\dot{\tilde{l}}_h - \eta) \operatorname{sgn}(S) \right] - \frac{\dot{\tilde{l}}_h \dot{\tilde{l}}_h}{n} \leq$$
$$B \frac{p}{q} e_2^{\frac{p}{q}-1} (-k_3 S^2 - \eta |S|) \quad (20)$$

由于 $1 < \frac{p}{q} < 2$, 得到 $e_2^{\frac{p}{q}-1} \geq 0$, 又 $B, k_3, \eta > 0$, 所以 $\dot{V} \leq 0$, 当且仅当 $e_2 = 0$ 时, $\dot{V} = 0$, 满足 Lyapunov 稳定性条件, 系统状态变量将在有限时间收敛到零。

4 仿真分析

4.1 PMSC 调速系统仿真

在 Matlab/Simulink 软件中, 搭建 PMSC 调速系统自适应 NFTSM 控制模型, 并与 PID、SMC、NTSM

控制效果进行对比, 控制器参数为: $A = 1, B = 0.005, G = 9, H = 5, p = 7, q = 5, k_3 = 20\,000, \eta = 50$ 。

仿真工况为原地转向, 转向盘转速大于或等于 $180^\circ/\text{s}$, 由图 8 可知该工况下转向泵理想转速为 600 r/min , 此时发动机转速应处于怠速状态, 所以发动机转速设为 700 r/min , 负载转矩为 $40\text{ N}\cdot\text{m}$, 由此可以得到自适应 NFTSM 对 PMSC 调速系统的控制性能图, 并与 PID、SMC、NTSM 3 种控制方法进行对比, 如图 9a 所示。图 9b 是在该仿真工况下, 实际转矩在不同控制方法下达到稳定值的时间 (即响应时间) 对比图。图 9c 是发动机转速在 0.4 s 时突然由 700 r/min 变化为 $1\,200\text{ r/min}$, 之后在 0.6 s 又变成 700 r/min 情况下, 自适应 NFTSM 与其他控制方法控制性能对比图。图 9d 是负载转矩在 0.4 s 由 $40\text{ N}\cdot\text{m}$ 突变为 $30\text{ N}\cdot\text{m}$, 0.6 s 又恢复到 $40\text{ N}\cdot\text{m}$ 情况下, 自适应 NFTSM 与其他控制方法控制性能对比图。

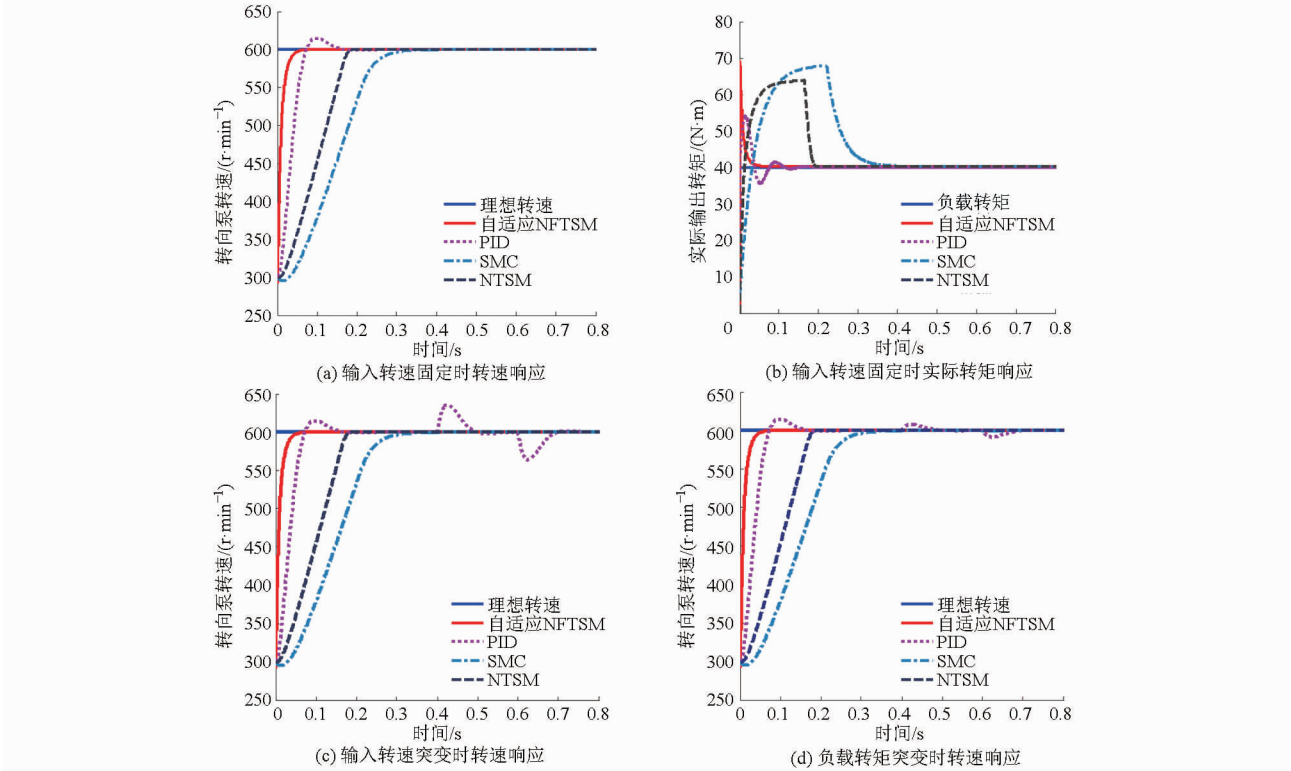


图 9 不同控制方法下的转速响应

Fig. 9 Speed response under different control methods

由图 9a 可见, 4 种控制方法都能使输出转速跟踪到理想转速, 但是自适应 NFTSM, 相较于 PID 没有超调, 且其大约在 0.06 s 时就能快速收敛, 达到稳定状态, 而 NTSM 和 SMC 分别在 0.18 s 和 0.35 s 附近达到稳定状态, 相较于 NTSM 和 SMC, 自适应 NFTSM 收敛速度大约提高了 66.7% 和 82.9% , 控制性能大大提高。由图 9b 可见, 自适应 NFTSM 控制的实际转

矩响应时间最小, 能快速达到稳定值。由图 9c 和图 9d 可见, 当输入转速 (发动机转速) 和负载转矩发生突变时, 自适应 NFTSM 与 NTSM、SMC 都能很好地克服外界干扰和系统存在的不确定性, 而 PID 抗干扰性较差。综合图 9 可见, 自适应 NFTSM 收敛速度最快, 满足系统对响应敏捷性的要求, 且具有很强的鲁棒性, 能保证闭环控制系统的稳定性。

4.2 P-ECHPS 系统助力特性仿真

根据所建立的 P-ECHPS 系统各部分模型,主要包括机械系统模型、液压系统模型、整车三自由度模型、转向阻力矩模型、自适应 NFTSM 控制系统模型,在 Matlab/Simulink 中搭建了 P-ECHPS 系统整车仿真模型,参考 SLK6118 型大客车的参数,仿真模型如

图 10 所示。车速信号分别选取为 5、20、40、60、80、100 km/h,转向盘转速都假设为 180°/s,转向盘转矩信号为斜坡信号,斜率为 10 N·m/s,分别达到 5、5.3、5.6、5.9、6.2、6.5 N·m(对应各车速下驾驶员所偏好的转向盘转矩)时不再变化,得到各特征车速下转向泵转速和助力油压曲线,分别如图 11、12 所示。

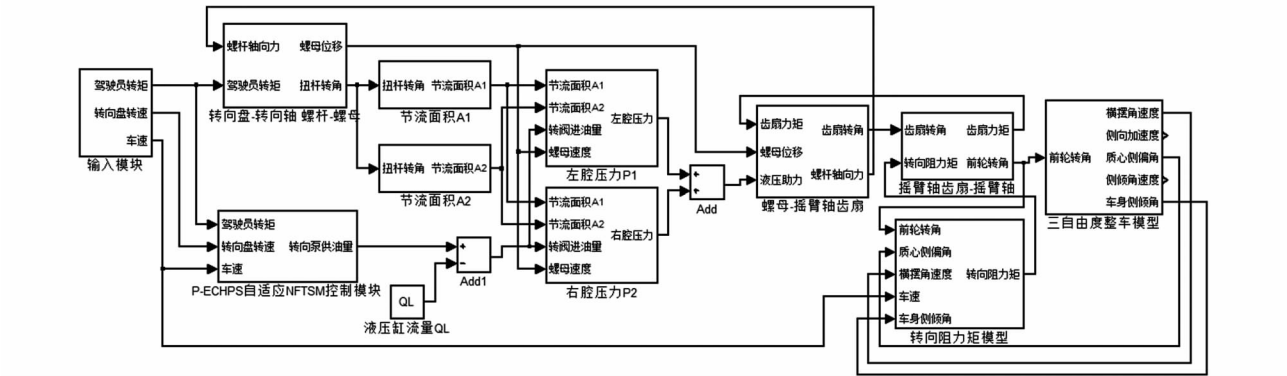


图 10 P-ECHPS 系统整车仿真模型
Fig. 10 Vehicle simulation model of P-ECHPS

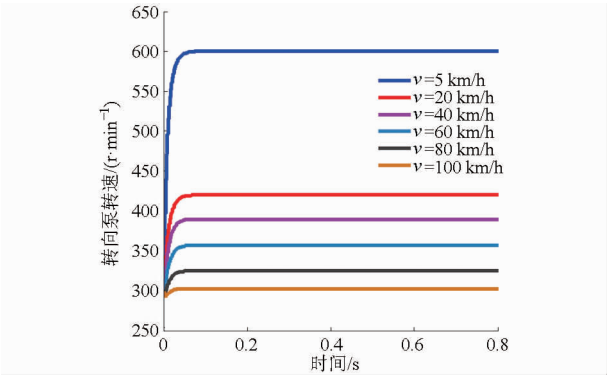


图 11 各特征车速下转向泵转速曲线
Fig. 11 Steering pump speed curves under different characteristic speeds

从图 11、12 中可以看出,随着车速的增加,通过自适应 NFTSM 控制,转向泵转速降低,各特征车速下助力油压在 1.5 s 左右基本趋于稳定,P-ECHPS 系统提供的助力油压也逐渐降低,其值与前面所设计的可变助力特性基本吻合,从而也间接验证了自适应 NFTSM 控制策略的准确性和有效性,实现了可变助力特性,满足了转向助力和路感的要求。

5 结束语

提出了一种新型转向系统 P-ECHPS,建立了

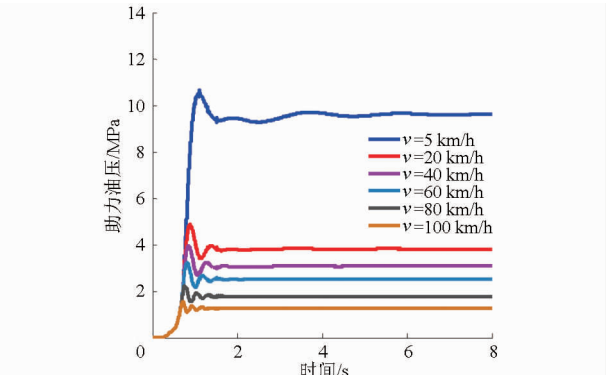


图 12 各特征车速下助力油压曲线
Fig. 12 Assist oil pressure curves under different characteristic speeds

该系统核心传动机构 PMSC 的调速模型及各子系统模型。运用自适应 NFTSM 控制策略对该系统进行控制,并设计了控制器。分别对 PMSC 调速性能和系统助力特性进行仿真,结果表明:所设计的控制器具有良好的控制性能,能保证闭环控制系统全局快速收敛,使得转速泵转速快速跟踪到理想转速,收敛速度相较于 SMC 和 NTSM 分别提高了近 82.9% 和 66.7%,且具有良好的抗干扰能力,使得重型车辆很好地实现可变助力特性,满足转向助力和路感的要求。

参 考 文 献

1 UTKIN V I. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2):212-222.

2 张晓光, 赵克, 孙力. 永磁同步电动机混合非奇异终端滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27):116-122.

ZHANG Xiaoguang, ZHAO Ke, SUN Li. Hybrid nonsingular terminal sliding mode control for permanent magnet synchronous

- motor drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27):116–122. (in Chinese)
- 3 ZAK M. Terminal at tractors in neural networks[J]. Physics Letters, 1989,2(4):259–274.
- 4 FENG Y, YU X, MAN Z. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatic, 2002, 38(12):2159–2167.
- 5 许波,朱焜秋. 自适应非奇异终端滑模控制及其在 BPMSM 中的应用[J]. 控制与决策,2014, 29(5):833–837.
XU Bo,ZHU Huangqiu. Adaptive nonsingular terminal sliding model control and its application to BPMSM[J]. Control and Decision, 2014, 29(5):833–837. (in Chinese)
- 6 冯勇,鲍晟,余星火. 非奇异终端滑模控制系统的设计方法[J]. 控制与决策,2002,17(2):194–198.
FENG Yong, BAO Sheng, YU Xinghuo. Design method of non-singular terminal sliding mode control systems[J]. Control and Decision, 2002, 17(2):194–198. (in Chinese)
- 7 FENG Y, ZHENG J F, YU X H, et al. Hybrid terminal sliding-mode observer design method for a permanent magnet synchronous motor control system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9):3424–3431.
- 8 吕永佳,张合新,吴玉彬. 基于 NTSM 的自适应最优滑模末制导律设计[J]. 弹箭与制导学报,2012, 32(1):69–72.
LÜ Yongjia, ZHANG Hexin, WU Yubin. Optimal terminal guidance law design based on NTSM and adaptive control[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(1):69–72. (in Chinese)
- 9 王尧尧,顾临怡,高明,等. 水下载器非奇异快速终端滑模控制[J]. 浙江大学学报:工学版,2014, 48(9):1541–1551.
WANG Yaoyao, GU Linyi, GAO Ming, et al. Nonsingular fast terminal sliding mode control for underwater vehicles[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2014, 48(9):1541–1551. (in Chinese)
- 10 周硕,王大志,高庆忠. 永磁同步电机的非奇异快速终端滑模控制[J]. 电气传动,2014, 44(11):51–54.
ZHOU Shuo, WANG Dazhi, GAO Qingzhong. Nonsingular fast terminal sliding mode control for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive, 2014,44(11):51–54. (in Chinese)
- 11 胡立坤,马文光,赵鹏飞. 六自由度机械臂的非奇异快速终端滑模控制[J]. 吉林大学学报:工学版,2014, 44(3):735–741.
HU Likun, MA Wenguang, ZHAO Pengfei. Non-singular fast terminal sliding mode control method for 6-DOF manipulator[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition, 2014, 44(3):735–741. (in Chinese)
- 12 熊少锋,王卫红,王森. 带攻击角度约束的非奇异快速终端滑模制导律[J]. 控制理论与应用,2014, 31(3):269–278.
XIONG Shaofeng, WANG Weihong, WANG Sen. Nonsingular fast terminal sliding-mode guidance with intercept angle constraint [J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(3):269–278. (in Chinese)
- 13 BAILL S J. Two new flowmeters have no moving parts[J]. Control Engineering, 1969, 16(12):73–77.
- 14 江浩斌,周泽磊,钱洋,等. 兼顾操纵性与节能性的 ECHPS 可变助力特性与控制策略[J]. 机械工程学报,2015, 50(5):17–26.
JIANG Haobin, ZHOU Zelei, QIAN Yang, et al. Variable assist characteristics and control strategies for ECHPS in terms of maneuverability and energy efficiency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 50(5):17–26. (in Chinese)
- 15 唐斌,江浩斌,陈龙,等. 基于微分几何的 E-ECHPS 车辆转向稳定性控制[J]. 农业机械学报,2015, 46(12):285–293.
TANG Bin,JIANG Haobin,CHEN Long,et al. Steering stability control of vehicles equipped with E-ECHPS based on differential geometry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):285–293. (in Chinese)
- 16 KO Y E, SONG C K. Vehicle modeling with nonlinear tires for vehicle stability analysis[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(3):339–344.
- 17 陈士安,邱峰,何仁,等. 车辆主销内倾引起的回正力矩的解析[J]. 农业机械学报,2008, 39(7):32–35.
CHEN Shian, QIU Feng, HE Ren, et al. Analysis of self-aligning torque from vehicle kingpin inclination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):32–35. (in Chinese)
- 18 LI Hao, DOU Lihua, SU Zhong. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for electromechanical actuator[J]. International Journal of Systems Science, 2013, 44(3):401–415.
- 19 陈庆诚,朱世强,RAJAT M,等. 基于 POE 的动力学建模与快速非奇异终端滑模控制[J]. 农业机械学报,2015, 46(6):310–318.
CHEN Qingcheng,ZHU Shiqiang, RAJAT M, et al. Dynamic modeling based on POE and non-singular terminal sliding mode control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):310–318. (in Chinese)
- 20 张巍巍,王京. 基于指数趋近律的非奇异 Terminal 滑模控制[J]. 控制与决策,2012,27(6):909–913.
ZHANG Weiwei,WANG Jing. Nonsingular Terminal sliding model control based on exponential reaching law[J]. Control and Decision, 2012, 27(6):909–913. (in Chinese)