

电动助力转向综合前馈和模糊 PID 反馈的电流控制算法*

吕威 郭孔辉 张建伟

(吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130025)

【摘要】 针对电动助力转向中的电流跟随控制问题,通过建立系统数学模型,分析系统型别,研究了常规 PID 控制和模糊 PID 控制在电流控制中的不足,采用前馈和反馈综合控制的思想,提出了综合前馈和模糊 PID 反馈的电流控制算法。通过实验对比表明,前馈和模糊 PID 反馈的综合控制方法可显著提高电流跟随控制的稳定性、快速性和准确性。

关键词: 车辆 电动助力转向 电流跟随 前馈控制 模糊 PID 控制

中图分类号: U461.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0010-06

Feed-forward Integrated with Fuzzy PID Feedback Current Control Algorithm in Electric Power Steering

Lü Wei Guo Konghui Zhang Jianwei

(State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

In order to solve the current tracking control problem in electric power steering (EPS), the system mathematical model was established and the system type was analyzed, disadvantages of the conventional PID control and fuzzy PID control were studied. Using the feed-forward and feedback integrating control theory, a feed-forward control integrated with fuzzy PID feedback control algorithm was proposed. Experiment comparisons showed that the proposed algorithm could significantly improve the system stability, response rapidity and following accuracy in current control of electric power steering system.

Key words Vehicle, Electric power steering, Current following, Feed-forward control, Fuzzy PID control

引言

电动助力转向系统 (electric power steering, 简称 EPS) 是一种采用电动机来辅助驾驶员转向的力矩伺服系统,其核心是电动机控制。为保证良好的转向平顺性和手感,要求电动机的控制具有稳定性、快速性和准确性。

国内外学者在电动助力转向系统的电流跟随控制方面做了大量研究,采用的方法可分为常规 PID 控制^[1-2]、模糊控制^[3]、模糊 PID 控制^[4-6]和鲁棒控制等,控制思路主要以电流反馈控制为主。然而,单纯的反馈控制在动态特性要求较高的系统中,始终

存在快速性与稳定性之间的矛盾。

本文通过建立 EPS 数学模型,分析系统型别,研究常规 PID 控制和模糊 PID 控制在电流控制中的不足。为克服反馈控制中快速性和稳定性的矛盾,采用反馈和前馈综合控制的思想,提出一种基于前馈的模糊 PID 控制算法。

1 EPS 建模分析

1.1 EPS 结构和工作原理

电动助力转向系统主要由机械转向系统、转向盘扭矩传感器、车速传感器、控制器、助力电动机及减速机构组成,其结构示意图如图 1 所示。

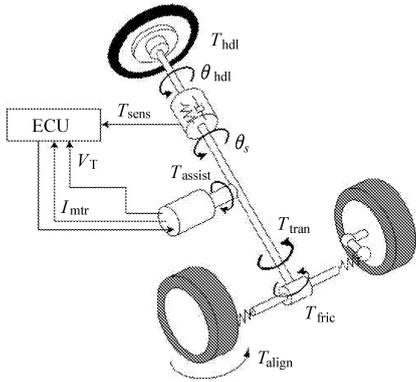


图 1 电动助力转向系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of EPS

当驾驶员转动转向盘时, EPS 控制器采集驾驶员的输入转矩, 并根据当前车速, 控制电动机产生合适的电流, 从而实现辅助驾驶员转向的功能。

1.2 EPS 动力学方程

为方便研究问题, 将 EPS 动力学模型做适当简化。系统模型采用电动机目标电流为输入, 忽略转向盘和转向轴惯量和摩擦, 将齿条和两侧车轮等效为弹簧质量系统, 则 EPS 动力学方程为

$$\theta_s = p/r_p \quad (1)$$

$$M_r \ddot{p} + B_r \dot{p} + K_r p = (T_s + T_{assist} G)/r_p \quad (2)$$

$$T_{assist} = K_m (\theta_m - \theta_s G) \quad (3)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T_{assist} = T_m \quad (4)$$

$$L \dot{i} + Ri + K_f \theta_m = U \quad (5)$$

$$T_m = K_t i \quad (6)$$

- 式中 θ_s ——转向轴转角 p ——齿条位移
 r_p ——小齿轮半径 θ_m ——电动机转角
 M_r ——齿条和车轮等效质量
 B_r ——齿条阻尼系数
 K_r ——齿条和车轮等效刚度
 T_{assist} ——电动机输入减速器的转矩
 G ——电动机减速器的涡轮蜗杆传动比
 K_m ——电动机传动轴刚度
 J_m ——电动机及蜗杆转动惯量
 B_m ——电动机阻尼系数
 T_m ——电动机电磁转矩
 L ——电动机电感 R ——电动机电阻
 i ——电动机电流 U ——电动机电压
 K_f ——电动机反电动势系数
 K_t ——电动机电磁转矩系数
 T_s ——扭矩传感器测量值

建立的电动助力转向模型如图 2 所示, 系统输入为电动机目标电流, 输出为电动机实际电流。

为方便分析问题, 将模型中的被控对象合并化简之后, 得到模型如图 3。

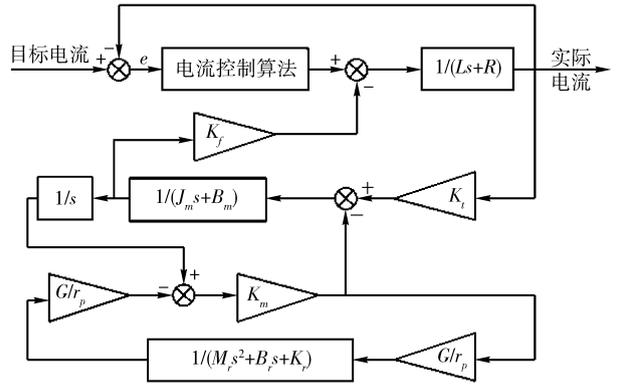


图 2 电动助力转向系统模型

Fig.2 EPS model

由图 3 可以看出, EPS 是一个典型的单位反馈控制系统, 其中

$$G_p(s) = \frac{G_2(s) + G_0(s) G_1(s) G_2(s)}{1 + G_0(s) G_1(s) + G_1(s) G_2(s) K_t K_f} \quad (7)$$

$$G_0(s) = \frac{K_m M_r s^2 + K_m B_r s + K_r K_m}{M_r s^3 + B_r s^2 + \left(K_r + \frac{G^2 K_m}{r_p^2} \right) s} \quad (8)$$

$$G_1(s) = \frac{1}{J_m s + B_m} \quad (9)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (10)$$

由开环传递函数(式(7))可以看出, EPS 是一个 0 型系统。由于 0 型系统存在原理性静差^[7], 因此电流跟随控制算法中必须存在积分环节, 将系统提高到 I 型, 从而消除电流的跟随静差。

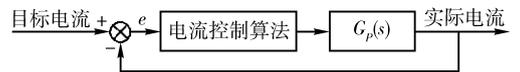


图 3 电动助力转向系统的化简模型

Fig.3 Simplified EPS model

2 电流跟随控制算法

2.1 PID 反馈控制

目前, 在 EPS 的电流控制研究中, PID 控制应用较为广泛。其主要原因是 PID 控制算法简单、鲁棒性好、可靠性高, 特别是 PID 控制不依赖于被控对象的精确模型, 只要了解对象的响应特性, 就可以得到满意的控制效果。近年来, 为提高 PID 算法的控制效果, 很多学者利用非线性特性提出了模糊 PID 控制算法。该算法继承了常规 PID 的诸多优点, 并且具有更大的灵活性、自适应性和精确性。

然而, PID 控制作为一种反馈控制方法, 当应用在 EPS 这类对动态特性要求较高的系统时, 始终存在快速性与稳定性之间的矛盾。增大比例系数能够提高响应速度, 减小稳态误差, 但过大又会导致超调振荡, 使系统稳定性变差; 增大微分系数可抑止超

调,但过大会使系统响应速度变慢,并引入噪声。

2.2 前馈控制

前馈控制是指在控制系统中,根据设定值或者外界干扰的变化,产生合适的控制作用去改变操纵变量,使受控变量维持在设定值上的一种控制方法^[8]。采用前馈的控制系统如图4所示。

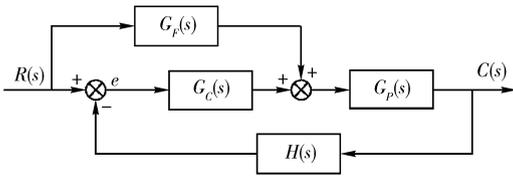


图4 前馈控制系统示意图

Fig. 4 Control system with feed-forward

图中, $G_C(s)$ 、 $G_P(s)$ 、 $H(s)$ 和 $G_F(s)$ 分别表示控制器传递函数、被控对象传递函数、反馈通道传递函数和前馈通道传递函数。

系统传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{(G_C(s) + G_F(s))G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)H(s)} \quad (11)$$

从式(11)可看出:前馈通道 $G_F(s)$ 的引入不影响该系统的特征方程 $1 + G_C(s)G_P(s)H(s) = 0$, 这说明前馈不影响系统的稳定性。

当 $H(s) = 1$ 时,系统的误差传递函数为

$$\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1 - G_F(s)G_P(s)}{1 + G_C(s)G_P(s)} \quad (12)$$

当前馈通道的传递函数满足不变性条件^[8]时

$$\Phi_e(s) = 0 \quad (13)$$

这时有

$$G_F(s) = \frac{1}{G_P(s)} \quad (14)$$

这说明,当前馈通道的传递函数为被控系统的逆模型时,系统的误差始终为0,此时 $C(s) = R(s)$, 即系统的输出可以完全复现输入。由于前馈控制量是直接通过信号源和前馈模型计算的,所以控制量直接反应信号源的变化,调节速度非常快。

2.3 基于前馈的模糊PID反馈控制

为充分利用前馈控制和反馈控制在稳定性、快速性和准确性方面的优点,提出“前馈-模糊PID反馈”的综合控制方法,其控制框图如图5所示。

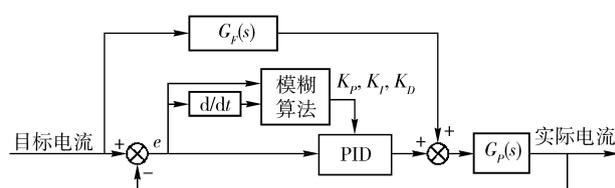


图5 采用前馈和模糊PID反馈的EPS控制模型

Fig. 5 EPS model with feed-forward and fuzzy PID feedback control

在前馈控制中,要完全实现不变性条件(式(14))

是困难的,因为被控系统的模型不可能精确获得,并且大多数被控对象的自身结构是时变的,同时如果前馈模型中存在纯超前环节或纯微分环节时,控制算法中只能进行近似处理,因此也会存在误差。因此,前馈控制可以消除电流跟随控制中大部分的跟随误差。

由于EPS是一种0型系统,电流的跟随控制必须要有积分环节。在模糊PID反馈控制中,当积分系数较大时,稳态误差消除速度快,但是系统稳定裕度会下降;当积分系数较小时,稳态误差消除速度慢,造成助力滞后,影响转向手感。在图5所示的综合控制方法中,反馈控制只用于消除由前馈控制作用后的跟随误差,由于控制量大大减小,因此可以选择较小的积分系数,以同时保证系统稳定性和快速性。

综上所述,前馈通过前馈模型计算得到的控制量,直接作用于被控对象,可以承担电流跟随控制过程中大部分的控制量,剩余的少量控制偏差由模糊PID消除。这种综合控制方法,不仅可以提高电流跟随速度,而且由于减小了反馈控制的调节量,电动机电流的跟随精度和系统稳定性都可以得到改善。

3 实验验证

分别采用阶跃、扫频和实车实验对常规PID、模糊PID和综合控制3种方法的控制效果进行对比。

3种控制方法的输出是PWM占空比,为0~1之间的值。在模糊PID控制中,采用三角形隶属函数。当偏差较大时,即 $e \geq 2$ 时,取较大的 K_p 以及较小的 K_i 和 K_d ;当偏差和变化率为中等大小时,即 $2 > e > 1$ 时,取较小的 K_p 和 K_d 以及适当的 K_i ;当偏差较小时,即 $e \leq 1$ 时,取较大的 K_p 和 K_i 以及适当的 K_d 。为具有可比性,综合控制方法中的PID参数和模糊PID的相同;模糊PID中偏差较小时的参数和常规PID的相同。3种控制方法中PID参数的选取如表1所示。

表1 3种控制方法的控制参数

Tab. 1 Control parameters of three methods

| 控制类型 | K_p | K_i | K_d |
|---------|-------|-------|-------|
| 常规PID控制 | 0.01 | 0.002 | 0.001 |
| 模糊PID控制 | 偏差小 | 0.01 | 0.002 |
| | 偏差中 | 0.03 | 0.001 |
| | 偏差大 | 0.05 | 0.001 |
| 综合控制 | 偏差小 | 0.01 | 0.002 |
| | 偏差中 | 0.03 | 0.001 |
| | 偏差大 | 0.05 | 0.001 |

3.1 阶跃实验

阶跃实验中,目标电流做如下给定:在 0.25 s 时由 0 跳变到 10 A,维持到 1.35 s,然后跳变到 0。采用 3 种控制方法得到的电动机电流响应如图 6 所示。

由图 6 可以看出,模糊 PID 相对于常规 PID,提高了电动机的响应速度,并且减小了超调。而综合控制方法进一步提高了响应速度,具有比常规 PID 和模糊 PID 更好的控制效果。

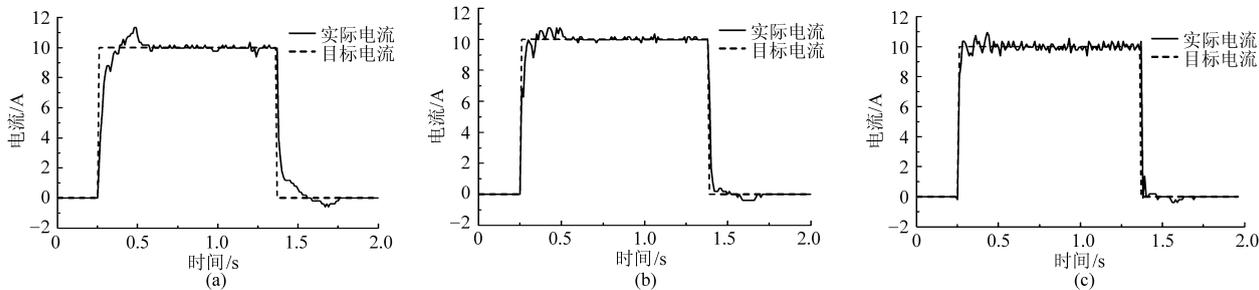


图 6 不同控制方法时的电流阶跃响应

Fig. 6 Current step response with different control methods

(a) 常规 PID 控制 (b) 模糊 PID 控制 (c) 综合控制

3 种控制方法中 PID 输出控制量的变化如图 7 所示,综合控制方法中前馈输出控制量的变化如图 8 所示。从图中可以看出,当采用综合控制方式时,前馈控制反应迅速,分担了所需的大部分控制量,其 PID 反馈控制量仅为常规 PID 和模糊 PID 的 1/3,因此显著改善了响应过程。

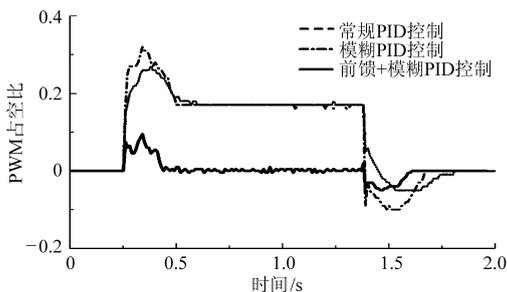


图 7 3 种控制方法的控制量变化曲线

Fig. 7 Control change curve with three control methods

3.2 扫频实验

为进一步验证电流的跟随效果,从频域的角度研究不同控制方法对电流响应的影响。测试方法是:给 EPS 控制器一个幅值为 10 A、频率为 0 ~ 30 Hz 的扫频目标电流。然后对测试得到的目标电

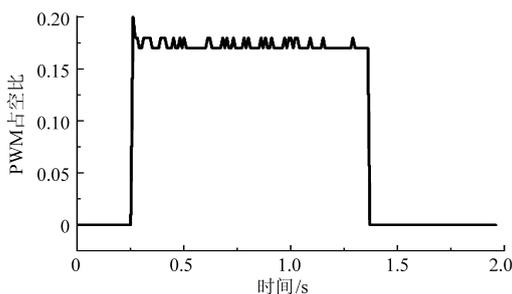


图 8 综合控制中的前馈控制量变化曲线

Fig. 8 Feed-forward control change curve with integrated control

流和实际电流进行傅里叶变换,得到两者之间的幅值比和相角滞后。3 种控制方法得到的扫频电流响应曲线如图 9 所示。

计算得到 3 种控制方法的输出电流对目标电流的幅值比和相角滞后量分别如图 10 和图 11 所示。不难看出,采用综合控制方法时,幅值比始终在 0.9 ~ 1.1 之间,提高了电流的跟随精度;而相角滞后量控制在 15° 以内,提高了电流的响应速度。

3.3 实车实验

为测试不同控制方法对转向平顺性和手感的影

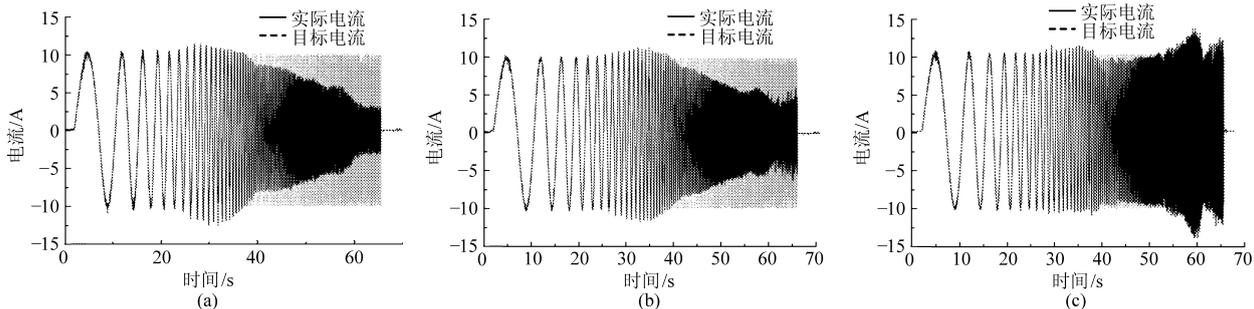


图 9 3 种控制方法的扫频电流响应

Fig. 9 Current responses with three control methods

(a) 常规 PID 控制 (b) 模糊 PID 控制 (c) 综合控制

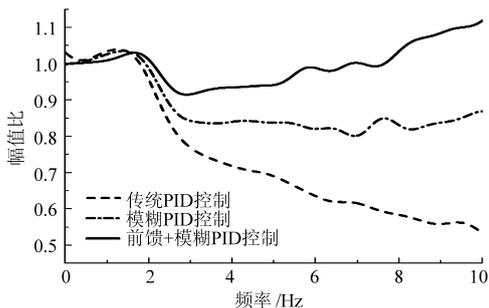


图10 输出电流对目标电流的幅值比

Fig. 10 Amplitude ratio of output to command current

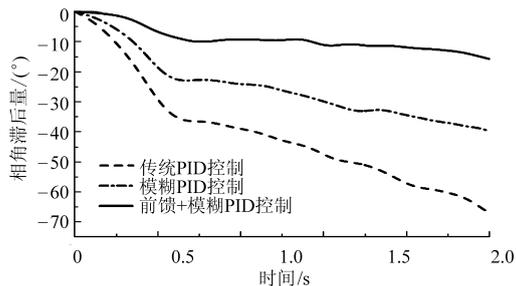


图11 输出电流对目标电流的相角滞后量

Fig. 11 Phase lag of output to command current

响,进行了实车的原地转向实验。理想的电动机电流对转向盘扭矩的关系如图12所示,3种控制方法得到的电动机电流对转向盘扭矩的关系如图13所示。可以看出,采用综合控制时,电动机电流对转向盘扭矩曲线最接近理想曲线,这表明电动机跟随转向盘扭矩速度最快,因此转向时的平顺性和手感也最好。

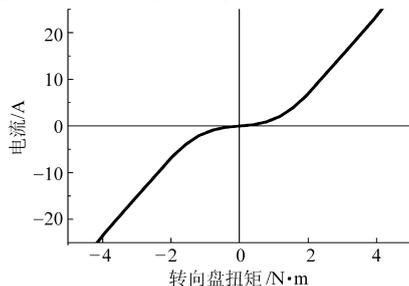


图12 理想电动机电流对转向盘扭矩的关系曲线

Fig. 12 Idle motor current vs steering wheel torque

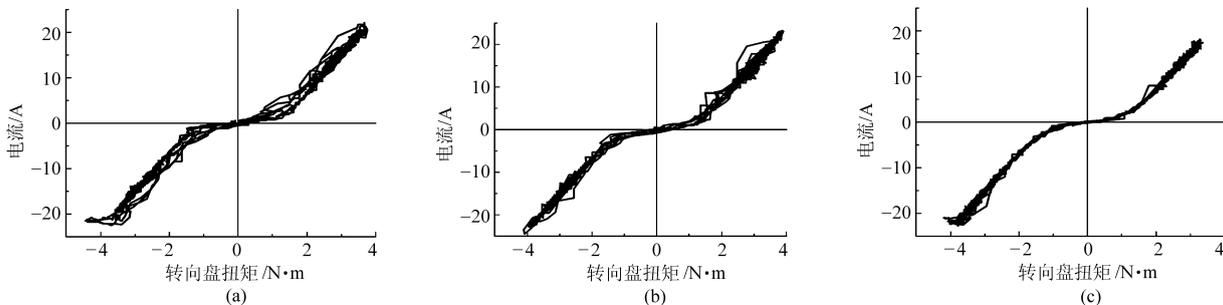


图13 不同控制方法时电动机电流对转向盘扭矩的关系曲线

Fig. 13 Motor current vs steering wheel torque with different control methods

(a) 常规PID控制 (b) 模糊PID控制 (c) 综合控制

4 结论

(1) 电动助力转向系统是一种0型系统,电流的跟随控制必须要有积分环节才能保证系统没有跟随误差。

(2) 由于控制方法中必须有积分环节,单纯的PID反馈控制将存在稳定性和快速性的矛盾。

(3) 基于前馈的模糊PID综合控制可以在保证系统稳定性的前提下,显著提高电动机电流的响应速度和精度。

参考文献

- 徐建平,何仁,苗立冬,等. 电动助力转向系统的建模与仿真分析[C]//中国汽车工程学会2003学术年会论文集, 2003:654~661.
- 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)
- 李书龙,许超. 电动助力转向系统中的模糊控制[J]. 公路交通科技, 2004,21(4):101~108.
Li Shulong, Xu Chao. Fuzzy control in electric power assisted steering system [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004,21(4):101~108. (in Chinese)
- 卢娟. 电动助力转向系统建模与仿真研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006:24~26.
Lu Juan. Modeling and simulation of electric power steering system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006:24~26. (in Chinese)

- 5 王雄波. 基于模糊控制的电动助力转向系统的研究与开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2008:38~44.
Wang Xiongbo. The study and development of electric power-assisted steering system based on fuzzy control[D]. Changsha: Hunan University, 2008:38~44. (in Chinese)
- 6 周冬林, 黄菊花, 曾群. 自适应模糊 PID 控制器在电动助力转向系统中的应用[J]. 制造业自动化, 2009,31(6):72~75.
Zhou Donglin, Huang Juhua, Zeng Qun. Application of fuzzy self-tuning PID controller in electric power steering system[J]. Manufacturing Automation, 2009,31(6):72~75. (in Chinese)
- 7 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000:209~212.
- 8 王树清, 戴连奎, 于玲. 过程控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:60~67.
- 9 徐海清. 一种基于非线性 PID 加前馈控制方法的仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004:31~35.
Xu Haiqing. Simulation research on a kind of nonlinear feed-forward PID control method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004:31~35. (in Chinese)
- 10 侯伯杰, 李小清, 周云飞, 等. 直线电动机伺服系统的复合前馈 PID 控制[J]. 机床与液压, 2009,37(2):56~58.
Hou Bojie, Li Xiaoqing, Zhou Yunfei, et al. The development of feed-forward plus PID controller for linear motor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009,37(2):56~58. (in Chinese)

(上接第 9 页)

参 考 文 献

- 1 余卓平, 左建令, 张立军. 路面附着系数估算技术发展现状综述[J]. 汽车工程, 2006,28(6):546~549.
Yu Zhuoping, Zuo Jianling, Zhang Lijun. A summary on the development status quo of tire-road friction coefficient estimation techniques[J]. Automotive Engineering, 2006,28(6):546~549. (in Chinese)
- 2 Yukihiisa Sasada. Development of the road surface condition sensing system[C] // International Conference on Intelligent Transportation Systems, Tokyo, 1999:14~19.
- 3 李君, 喻凡, 张建武. 基于道路自动识别 ABS 模糊控制系统的研究[J]. 农业机械学报, 2001,32(5):26~29.
Li Jun, Yu Fan, Zhang Jianwu. Fuzzy control of an ti-lock braking system based on road automat identification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(5):26~29. (in Chinese)
- 4 周斯加, 罗玉涛, 邓志君. 基于自适应滤波的电动车纵向滑移率识别方法[J]. 交通与计算机, 2007,25(3):70~74.
- 5 ARabhi N K M, Sirdi A Elhajjaji. Estimation of contact forces and tire road friction[C] // 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens Greece, 2007:1~6.
- 6 Carlos Canudas-de-Wit, Tsiotras P, Velenis E, et al. Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2003,39(3):189~226.
- 7 Ray L R. Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(1):117~124.
- 8 齐志权. 汽车 ABS/TCS/ASS 集成系统中 ABS 控制技术的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
Qi Zhiquan. Research on control technology of antilock braking system in integrated ABS/ASR/ACC system for motor vehicles [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- 9 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.