

汽车 EPS 回正工况模糊 PID 控制及试验

赵景波¹, 贝绍轶¹, 陈 龙²

(1. 江苏技术师范学院 机械与汽车工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 汽车转向盘回正时, 存在回正不足和回正超调现象. 为了增强汽车电动助力转向系统(EPS)的回正性能, 建立了 EPS 系统动力学模型和汽车三自由度转向模型, 设计了回正工况的模糊 PID 控制, 进行了仿真分析和实车试验. 结果表明: 对回正工况采用模糊 PID 控制后, 30 km/h 时的最终残留角为 6°, 得到改善, 60 km/h 时的“摆头”现象得到明显抑制, 回正不足或回正超调控制得到改善; 满足系统的回正性能, 提高了系统的鲁棒性能和驾驶手感.

关键词: 汽车; 电动助力转向; 回正工况; 模糊 PID 控制

中图分类号: TP29; U463.4 **文献标志码:** A

0 引言

汽车转向盘回正时, 转向轮主销后倾角和主销内倾角使得转向轮具有自动回正的作用. 但在汽车低速行驶时易出现回正不足, 高速时出现回正超调, 因此, 必须进行回正控制: 在低速时, 保持良好的回正性, 在高速时, 提高转向稳定性.

EPS 系统回正控制的目标是改善转向回正特性, 使汽车具有理想的回正性能而更好地符合汽车动态特性. 车辆低速行驶时, 回正曲线必须通过原点, 高速行驶回正时, 回正曲线允许有残留角, 但该残留角不允许超过 5°^[1]. 由于 EPS 系统的非线性、时变性等不确定性因素, 回正工况的控制存在参数修改不方便、不能进行自整定等缺点, 难以达到预期的控制效果. 笔者利用模糊控制和 PID 控制的优点, 设计回正工况的模糊 PID 控制, 根据模糊规则在线修正 PID 控制器参数, 进行仿真分析和实车试验, 同时满足回正工况中的回正要求和阻尼要求.

1 系统动力学模型

1.1 EPS 系统动力学模型

EPS 系统的动态模型如图 1 所示^[2-3], 机械部分主要可分为转向盘和转向轴、电动机、减速结

构和齿轮齿条四部分, 根据牛顿运动学定律建立各部分的动力学模型, 然后根据各部件之间的相互约束关系, 得到整个系统的模型^[2-3].

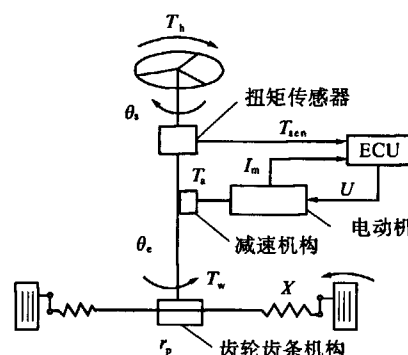


图 1 EPS 系统动力学模型

Fig.1 Dynamic model of EPS system

$$\begin{cases} J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s + K_s \theta_s = T_h + K_s \frac{x_r}{r_p} \\ J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + K_r \theta_m = T_m + GK_m \frac{x_r}{r_p} \\ m_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r + k_r x_r = GK_m \frac{x_r}{r_p} \theta_m + K_s \frac{\theta_s}{r_p} - F_\delta \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_s 为转向盘、输入轴的转动惯量; B_s 为输入轴黏性阻尼系数; θ_s 为输入轴旋转角; K_s 为扭杆的刚性系数; T_h 为作用在转向盘上的转向转矩; x_r

收稿日期: 2011-04-26; 修订日期: 2011-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875112); 江苏省高校自然科学基金项目(11KJD580001).

作者简介: 赵景波(1980-), 男, 山东寿光人, 江苏技术师范学院讲师, 博士, 主要从事汽车动态性能模拟与控制、汽车电子技术方面的研究, E-mail: zhaobjb1128@yahoo.com.cn.

为齿条位移; J_m 为电动机和离合器的转动惯量; B_m 为电动机黏性阻尼系数; θ_m 为电动机转角; T_m 为电动机电磁转矩; K_m 为电动机和减速机输出轴刚性系数; G 为减速比; M_r 为减速机构、小齿轮和齿条等的当量质量; B_r 为减速机构、小齿轮和齿条等的当量阻尼系数; K_r 为小齿轮、齿条和轮胎的等效刚度系数; x_r 为齿条位移; F_s 为路面的随机作用力。

取状态变量 $X_1 = [\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}, \theta_m, \dot{\theta}_m]^T$, 输入量 $U_1 = [T_h, T_m, T_s]^T$; 输出量 $Y_1 = [T_{sen}, T_L, \theta, \dot{\theta}, \theta_m, \dot{\theta}_m, x, \dot{x}]^T$, 建立 EPS 系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = A_1 X_1 + B_1 U_1 \\ Y_1 = C_1 X_1 + D_1 U_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{J_s} & -\frac{B_s}{J_s} & \frac{K_s}{J_s r_p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_s}{M_r r_p} & 0 & -\frac{K_r}{M_r} & -\frac{B_r}{M_r} & \frac{K_r G}{M_r r_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{K_r G}{J_m r_p} & 0 & -\frac{K_r}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{M_r} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_m} & 0 \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} K_s & 0 & -\frac{K_s}{r_p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_r G}{r_p} & 0 & K_r & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

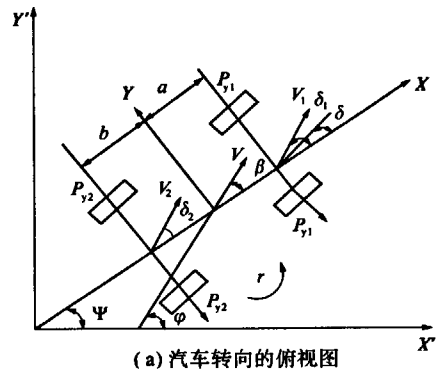
1.2 汽车三自由度转向模型

为研究 EPS 回正控制及其控制算法对整车性能的影响, 建立汽车三自由度转向动力学模型^[4], 汽车高速转向的运动状态如图 2 所示。

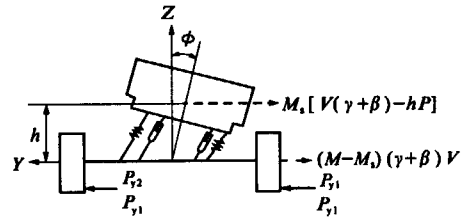
根据达朗贝尔原理, 取 M 为整车质量; M_s 为悬架质量; I_z, I_x 为整车绕 Z, X 轴的惯性矩; ω_r 为车身的横摆角速度; I_{xz} 为惯性积; P_{y1}, P_{y2} 为前、后车轮侧向力; a, b 为重心至前、后轴距; $C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$ 为

前、后悬架侧倾角刚度; D_r, D_s 为前、后悬架侧倾角阻尼; h 为侧倾力臂; φ 为重心的速度与绝对坐标的夹角; u 为汽车速度; β 为重心处的侧偏角; ω_p 为侧倾角速度。建立平衡方程^[4], 有

$$\begin{cases} I_z \dot{\omega}_r + I_{xz} \dot{\omega}_p = -aP_{y1} + bP_{y2} \\ (M - M_s)(\omega_r + \beta)u + M_s[(\omega_r + \beta)u + h\dot{\omega}_p] \\ = -(P_{y1} + P_{y2}) \\ I_x \dot{\omega}_p - M_s h u (\omega_r + \beta) + I_{xz} \dot{\omega}_r = -(D_r + D_s)\omega_p - (C_{\phi 1} + C_{\phi 2} - M_s g h)\varphi \end{cases} \quad (3)$$



(a) 汽车转向的俯视图



(b) 汽车转向的后视图

图 2 汽车运动状态的坐标表示

Fig. 2 Coordinates of the car running status

取状态变量 $X_2 = [\omega_r, \beta, \omega_p, \phi]^T$, 控制输入量 $U_2 = [\delta]^T$, 输出量 $Y_2 = [\omega_r, \beta, \omega_p, \phi]^T$, 得到状态空间方程, 为

$$\begin{cases} \dot{X}_2 = A_2 X_2 + B_2 U_2 \\ Y_2 = C_2 X_2 + D_2 U_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{X}_2 = [M]^{-1} E X_2 + [M]^{-1} [n] \delta$, $A_2 = [M]^{-1} E$,

$$B_2 = [M]^{-1} [n], C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D_2 = 0.$$

$$\text{其中, } [M] = \begin{bmatrix} I_z & 0 & I_{xz} & 0 \\ 0 & M u & -M_s h & 0 \\ I_{xz} & -M_s h u & I_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} N_r & N_\beta & 0 & N_\phi \\ Y_r - Mu & Y_\beta & 0 & Y_\phi \\ M_{\phi hu} & 0 & L_p & L_\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, n = \begin{bmatrix} N_\delta \\ Y_\delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

1.3 EPS 系统回正控制结构

EPS 系统回正控制结构如图 3 所示,模糊 PID 控制根据回正工况的特点和传感器信号输入,控制电机输出转矩的大小和方向,满足回正控制目标,并且保证系统获得期望的稳态精度和输入输出的动态特性、减少扰动和参数变化的影响.整车系统在回正工况及模糊 PID 控制下输出响应,以横摆角速度 ω_r 、车身质心侧偏角 β 和车身侧倾角 ϕ 作为操纵稳定性的评价指标,反映 EPS 系统对整车操纵稳定性的影响.

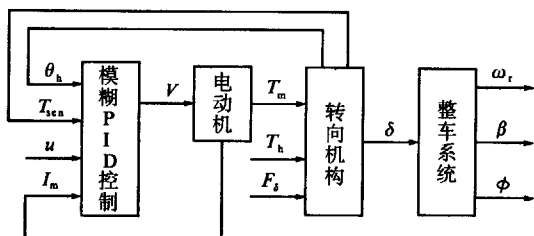


图 3 EPS 系统回正控制结构

Fig. 3 Return-to-center control structure of EPS system

2 模糊 PID 控制设计及分析

2.1 模糊 PID 控制设计

回正控制由两部分组成^[5]:回正控制和阻尼控制.制回正控制主要功能是提供必要的助力使转向盘能容易地回到中间位置.此时,回正控制实际上是一个 PI 调节器,它对目标转向盘位置(0)和实际转向盘位置 θ_h 的偏差 e_h 进行调节,输出控制电压,使电动机将转向盘带到中位,为

$$V_{mr1} = -(K_p e_h + K_i \int e_h dt) \quad (5)$$

式中: V_{mr1} 为电动机的回正控制电压; $e_h = 0 - \theta_h$; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数.

阻尼控制是使车辆在有阻尼的情况下回到中间位置而避免摆振.此时,根据转向盘回正时的角速度产生一控制电压,使电动机产生一阻尼转矩.通过调节阻尼系数,可以调节转向盘的回正速度,为

$$V_{mrh} = -K_d \dot{e}_h \quad (6)$$

式中: V_{mrh} 为电动机的回正控制电压; K_d 为微分系数.

实际应用中,将回正控制和主动阻尼控制复

合成一个 PID 回正控制算法,通过调节其系数,可获得不同效果的回正方式,即

$$V_{mr} = -(K_p e_h + K_i \int e_h dt + K_d \dot{e}_h) \quad (7)$$

式中: V_{mr1} 为电动机的回正控制电压.

在 EPS 系统中,可利用电动机电压和电流来估计电动机转速,再通过积分环节估计转向盘转角.根据电动机等效电路及其运行特性,在电动机运行过程中,有

$$\begin{cases} \hat{\omega}_m = \omega_m = \frac{V_m - R_m i_m}{K_m} \\ \hat{\theta}_h = \frac{1}{G} \theta_m = \frac{1}{G} \int \omega_m dt = \frac{1}{G} \int \hat{\omega}_m dt \end{cases} \quad (8)$$

因此,有

$$V_{mr} = -(K_p \hat{\theta}_h + K_i \int \hat{\theta}_h dt + K_d \dot{\hat{\theta}}_h) \quad (9)$$

该式结合回正控制和阻尼控制,但由于 EPS 系统的非线性、时变性等不确定性因素,存在参数修改不方便、不能进行自整定等缺点,难以达到预期的控制效果^[6].回正工况的模糊 PID 控制结合模糊控制和 PID 控制的双重优点,根据所设计的模糊规则在线修正 PID 控制器参数,可提高系统的回正性能、鲁棒性能,改善驾驶员手感.

回正工况的模糊 PID 控制如图 4 所示^[7],模糊控制器在线调整 PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 参数,实现动态的优化控制.模糊 PID 控制器的输入为转向盘转角偏差 e_h 及其偏差变化率 \dot{e}_h ,输出为 K_p 、 K_i 、 K_d 的变化率 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d .模糊 PID 控制的作用采用模糊控制的方法,在不同增量(目标转向盘转角和实际转向盘转角的偏差)和增量变化率的情况下,确定 PID 控制的不同 K_p 、 K_i 、 K_d ,此时模糊控制器的输入是增量和增量变化率,输出是 K_p 、 K_i 、 K_d .在响应过程的开始阶段,取较小的 K_i 和较大的 K_d ,避免积分饱和和超调;在响应过程的中期阶段,取较大的 K_i 和较小的 K_d ,提高调节精度.

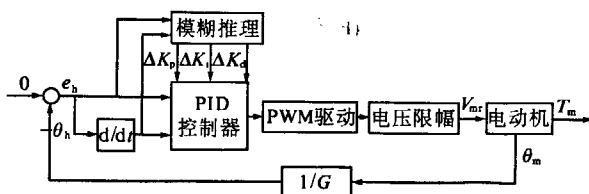


图 4 模糊 PID 控制器结构

Fig. 4 Structure of fuzzy-PID controller

e_h 和 \dot{e}_h 的基本论域为 $e_h \in [-60, 60]$, 其论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$,

6}, 模糊子集为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}. ΔK_p 的基本论域为 $\Delta K_p \in [-20, 20]$, ΔK_i 和 ΔK_d 的基本论域为 $\Delta K_i \in [-10, 10]$; 其模糊子集的论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 模糊子集为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}. 针对 K_p 参数分别整定的模糊控制规则表如表 1 所示. 同理推出 K_i 、 K_d 的模糊控制规则.

表 1 K_p 的模糊控制规则表Tab. 1 Rule table of fuzzy-PID controller for K_p

e_h	e_h						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

2.2 仿真实验及分析

在模糊 PID 控制下, 与无控制情况进行低速回正和高速回正仿真分析. 将方向盘从某一个角度放开, 观察其有无回正控制及方向盘回正中心的距离. 分别在车速为 30 km/h 和 60 km/h 下进行回正控制仿真, 结果如图 5 所示.

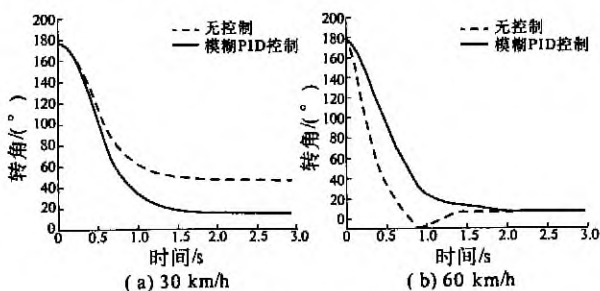


图 5 回正控制比较

Fig. 5 Compare under return-to-center condition

结果表明, 回正工况下模糊 PID 控制能使转向盘更快地回到接近中心位置, 降低了回正不足或回正超调现象. 在 30 km/h 时, 在无控制时, 1s 后的残留转向盘转角约为 65°, 模糊 PID 控制时约为 36°, 残留转向盘转角减小; 最终的残留转向盘转角在无控制时约为 46° 左右, 在模糊 PID 控制时约为 15° 左右, 低速时回正的不足现象得到改善. 从回正的速度上来看, 在模糊 PID 控制时比无控制时要迅速. 因此, 无论是从残留转向盘转角的大小还是从回正的速度上都可以看出车辆的回正性能得到了改善. 在 60 km/h 回正试验中, 在无

控制时“摇头”现象比较明显, 在模糊 PID 控制时的“摇头”现象大幅衰减.

2.3 实车试验及分析

以某 CH7140 轿车为试验对象, 设计汽车 EPS 系统实车试验平台, 其构架如图 6 所示, 该平台主要由控制器系统、实车系统、传感器系统和数据采集与分析系统等组成^[8].

在模糊 PID 控制下, 分别与无控制情况和原车控制情况进行低速回正试验和高速回正试验. 转向盘的自动回正能力可以使汽车保持在稳定的直线行驶状态, 分别在 30, 60 km/h 下将方向盘从 180° 左右角度放开, 观察有无回正控制及转向盘与接近中心位置的距离, 如图 7 所示.



图 6 实车试验平台

Fig. 6 Real vehicle test setup

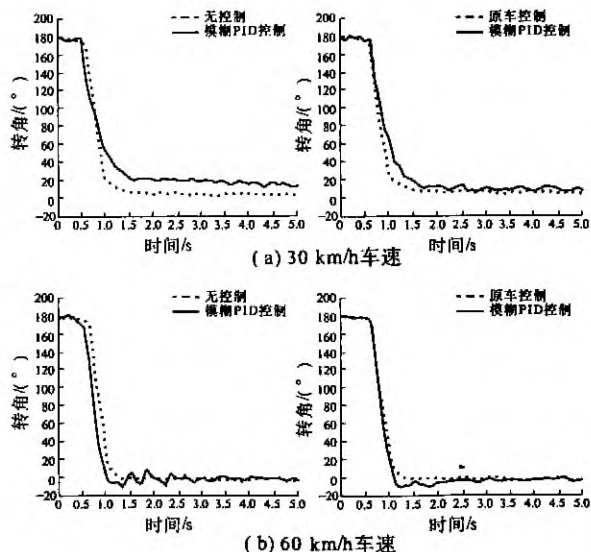


图 7 回正控制试验

Fig. 7 Test under return-to-center condition

结果表明, 模糊 PID 控制能使转向盘更快地回到接近中心位置, 降低了回正不足或回正超调现象. 在 30 km/h 回正试验中, 在无控制时, 驾驶员撒手 1 s 后残留转向盘转角约为 57°, 在原车控制时约为 36°, 在模糊 PID 控制时约为 24°, 残留转向盘转角减小; 最终的残留转向盘转角在无控

制时约为 15° 左右,在原车控制时约为 10° ,在模糊 PID 控制时约为 6° 左右,低速时回正的不足现象得到改善.从回正的速度上来看,模糊 PID 控制时比无控制和原车控制时都要迅速.因此,无论是从残留转向盘转角的大小还是从回正的速度上都可以看出车辆的回正性能得到了改善.

在 60 km/h 回正试验中,从回正时转向超调量的变化来看,在无控制和原车控制时“摆头”现象比较明显,在模糊 PID 控制时大幅衰减.

3 结论

(1)汽车转向盘回正时,存在回正不足和回正超调现象. EPS 系统回正工况的模糊 PID 控制改善了低速行驶的最终残留角和稳定时间,抑制了高速行驶的“摆头”现象;满足系统的回正性能,提高了系统的鲁棒性能和驾驶手感.

(2)EPS 系统回正工况的模糊 PID 控制对 EPS 系统控制策略开发、功能增强和优化以及转向操纵安全的提高具有重要的工程应用意义.

参考文献:

[1] 赵景波. 汽车 EPS 混杂控制系统理论、设计及实现

研究[D]. 常州:江苏大学汽车与交通工程学院, 2009.

- [2] Zhao Jing-bo, Chen Long, Jiang Hao-bin, et al. Design and full-car tests of electric power steering system [C]//Computer and Computing Technologies in Agriculture. United States: SPRINGER, 2008: 729 - 736.
- [3] 孙立军, 陈龙, 赵景波, 等. 汽车电动助力转向系统助力特性研究及试验[J]. 郑州大学学报:工学版, 2007, 28(4): 117 - 121.
- [4] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- [5] 冯引安. 汽车电动助力转向系统建模及控制算法研究[D]. 重庆:重庆大学自动化学院, 2007.
- [6] 刘方. 电动助力转向系统控制策略的研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2007.
- [7] 王耀南. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] 汽车工程手册编辑委员会. 汽车工程手册: 试验篇[M]. 1 版. 北京: 人民交通出版社, 2001.

Fuzzy-PID Control and Test of Automotive EPS System Under Return-to-Center Condition

ZHAO Jing-bo¹, BEI Shao-yi¹, CHEN Long²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: There exists wheel returnability at low speed and aligning overshoot at high speed when returning. In order to enhance the returnability of electric power steering (EPS) system, the EPS system dynamics and the 3-DOF automotive steering model are established, the fuzzy-PID controller under return-to-center condition is designed and the simulation analysis and real vehicle tests are made. The results show that, based on fuzzy PID control under return-to-center condition, the time of the final residual angle is b and stability are improved respectively at 30 km/h, and the "swing" phenomenon is inhibited at 60km/h. The control strategy can improve the wheel returnability at low speed and restrain the aligning overshoot at high speed to satisfy the returnability and to improve the robust performance and driving feel.

Key words: automobile; electric power steering; return-to-center condition; fuzzy-PID control