

车辆半主动悬架系统模糊混合控制策略*

严天一 任坤儒 王玉林 张鲁邹

(青岛大学机电工程学院, 青岛 266071)

【摘要】 在建立4自由度1/2车辆半主动悬架系统模型基础上,首先研发了兼顾车辆平顺性与道路友好性的模糊混合控制策略,然后利用自行开发的以Freescale MC9S12XDP512为核心处理芯片的16位电子控制单元,并结合Matlab/Real-time Windows Target模块搭建了车辆半主动悬架系统控制策略硬件在环仿真平台,在该平台开展了基于硬件在环的半实物仿真试验,深入验证模糊混合控制策略的实车应用可行性。试验结果表明,与天棚控制、地棚控制相比,所提出的模糊混合控制策略可以有效兼顾车辆平顺性和道路友好性,具有较好的实车应用前景。

关键词: 车辆 半主动悬架系统 模糊混合控制策略 平顺性 道路友好性

中图分类号: U469.4; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0011-05

Fuzzy Hybrid Control Strategy of Semi-active Suspensions for Vehicle

Yan Tianyi Ren Kunru Wang Yulin Zhang Luzou

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract

A half-car model of semi-active suspension systems with 4-DOF was established. An innovative fuzzy hybrid control strategy considering both ride quality and road-friendliness was developed. For deeply verifying the application of the proposed control strategy in real vehicles, a platform of hardware-in-the-loop was built for evaluating the proposed control strategy of semi-active suspension systems using a self-designed electronic control unit based on Freescale MC9S12XDP512 microcontroller and Matlab/Real-time Windows Target toolbox. A series of hardware-in-the-loop simulation were conducted by using the platform. It showed that compared with skyhook control strategy and groundhook control strategy, HIL-based fuzzy hybrid control strategy can make a balance between vehicle ride and road-friendly and had the application feasibility.

Key words Vehicle, Semi-active suspension, Fuzzy hybrid control strategy, Ride quality, Road-friendliness

引言

车辆在行驶过程中,由于路面不平引起的车身振动会给车辆平顺性带来不利影响。同时,车身振动通过车轮反作用在路面上,造成路面损伤或破坏,降低路面使用寿命。合理设计车辆悬架系统既可以有效地改善车辆平顺性,同时又能降低车辆-路面动态载荷^[1]。传统被动悬架系统因其悬架刚度和阻尼系数无法实时自动调整,严重制约其平顺性和道

路友好性的提升空间^[2];主动悬架系统虽然具有较好技术性能,但其结构复杂,实现难度大,功率消耗高,尚无法得到广泛应用^[3]。半主动悬架系统因其结构简单,且磁流变阻尼器件的日趋成熟,近年来成为本领域的研究热点^[4]。智能模糊控制可融合专家控制经验和知识,有效解决半主动悬架系统存在着大量的不确定性、时变性和非线性问题,已成为开发控制策略的主要方法^[5-7]。

利用纯粹软件模型的半主动悬架系统控制策略

仿真结果通常比较理想,距实车应用存在很大的距离。因而,在软件仿真系统中引入部分真实的硬件实物,进行软件模型与硬件相互结合的半实物仿真,是对各种复杂车辆半主动悬架系统控制策略进行前期测试的有效方法^[8]。

为了兼顾车辆平顺性与道路友好性,本文以4自由度1/2车辆半主动悬架系统模型为控制对象,提出一种模糊混合控制策略,并构建硬件在环仿真平台,开展模糊混合控制策略半实物仿真试验,验证该控制策略的可行性。

1 1/2 车辆半主动悬架系统模型构建

遵循以下合理假设以便于简化动力学建模过程^[9]:①除轮胎、悬架弹簧和减振器之外,其余构件均简化为刚体。②悬架系统由线性弹簧和粘性阻尼器组成,车轮简化为线性弹簧,并保证始终与地面接触。③车身俯仰角较小,簧载质量质心相对路面激励作垂直方向运动。建立如图1所示的车辆半主动悬架系统动力学模型。

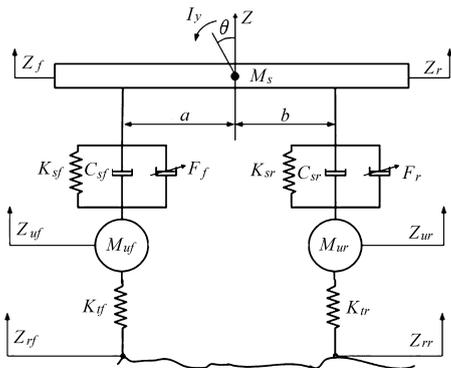


图1 1/2 半主动悬架系统模型

Fig.1 1/2 model of semi-active suspension system

根据牛顿第二定律,4自由度1/2车辆半主动悬架系统的运动微分方程可表示为

$$\begin{cases} M_s \ddot{Z} + K_{sf}(Z - a\theta - Z_{uf}) + K_{sr}(Z + b\theta - Z_{ur}) + \\ C_{sf}(\dot{Z} - a\dot{\theta} - \dot{Z}_{uf}) + C_{sr}(\dot{Z} + b\dot{\theta} - \dot{Z}_{ur}) = F_f + F_r \\ I_y \ddot{\theta} - aK_{sf}(Z - a\theta - Z_{uf}) + bK_{sr}(Z + b\theta - Z_{ur}) - aC_{sf}(\dot{Z} - \\ a\dot{\theta} - \dot{Z}_{uf}) + bC_{sr}(\dot{Z} + b\dot{\theta} - \dot{Z}_{ur}) = -aF_f + bF_r \\ M_{uf} \ddot{Z}_{uf} - K_{sf}(Z - a\theta - Z_{uf}) - C_{sf}(\dot{Z} - a\dot{\theta} - \dot{Z}_{uf}) + \\ K_{uf}(Z_{uf} - Z_{rf}) = -F_f \\ M_{ur} \ddot{Z}_{ur} - K_{sr}(Z + b\theta - Z_{ur}) - C_{sr}(\dot{Z} + b\dot{\theta} - \dot{Z}_{ur}) + \\ K_{r}(Z_{ur} - Z_{rr}) = -F_r \end{cases} \quad (1)$$

式中 M_s ——簧载质量

M_{uf} ——前悬架非簧载质量

M_{ur} ——后悬架非簧载质量

I_y ——簧载质量俯仰运动的转动惯量

K_{yf} ——前轮胎垂直刚度

K_{yr} ——后轮胎垂直刚度

K_{sf} ——前悬架弹簧刚度

K_{sr} ——后悬架弹簧刚度

C_{sf} ——前悬架阻尼器阻尼系数

C_{sr} ——后悬架阻尼器阻尼系数

Z_{uf} ——前悬架非簧载质量垂直位移

Z_{ur} ——后悬架非簧载质量垂直位移

Z_{rf} ——前悬架路面垂直扰动输入位移

Z_{rr} ——后悬架路面垂直扰动输入位移

Z ——簧载质量垂直方向位移

θ ——簧载质量俯仰角度

a ——前轮轴心到车身质心之间的距离

b ——后轮轴心到车身质心之间的距离

F_f ——前轮阻尼器产生的调节力

F_r ——后轮阻尼器产生的调节力

2 模糊混合控制策略

模糊混合控制策略是以 Goncalves 提出的混合控制策略为框架,以兼顾平顺性和道路友好性^[10],混合控制策略可表示为

$$F = G[\alpha \delta_{sky} + (1 - \alpha) \delta_{gnd}] \quad (2)$$

其中

$$\delta_{sky} = \begin{cases} v_1 & (v_1 v_{12} \geq 0) \\ 0 & (v_1 v_{12} < 0) \end{cases}$$

$$\delta_{gnd} = \begin{cases} v_2 & (v_1 v_{12} \geq 0) \\ 0 & (v_1 v_{12} < 0) \end{cases}$$

式中 G ——增益系数

α ——阻尼力分配系数

δ_{sky} ——基于天棚开关变量

δ_{gnd} ——基于地棚开关变量

v_1 ——簧载质量绝对振动速度

v_2 ——非簧载质量绝对振动速度

v_{12} ——簧载质量与非簧载质量相对速度

通过调整 α 的值,可改变车辆平顺性和道路友好性,但传统混合控制策略中 α 的值是预先设置的常值,不能随着路面状况的变化而自动调节,很难得到理想的控制效果。本文提出一种模糊混合控制策略(图2),以簧载质量绝对振动速度 v_1 、非簧载质量绝对振动速度 v_2 为模糊混合控制器输入,以阻尼力分配系数 α 为模糊混合控制器输出,根据 v_1 、 v_2 的变化,实时智能调节 α 。 v_1 、 v_2 、 α 均取5个语言变量,分别为零(O)、小(S)、中(M)、大(L)、极大(V),语言变量均选三角型隶属度函数,经过大量试验后优

化的 v_1 、 v_2 、 α 的隶属度函数如图 3 所示。

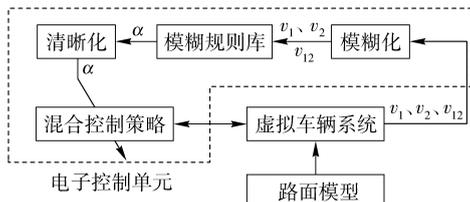


图 2 模糊混合控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of fuzzy hybrid control strategy

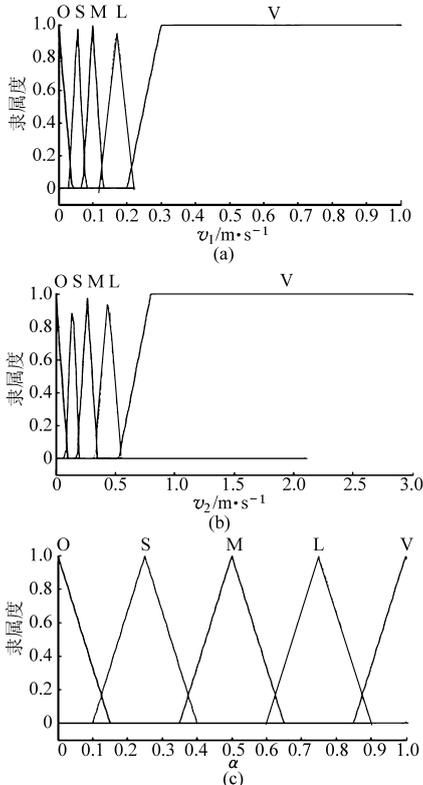


图 3 模糊混合控制器的隶属度函数

Fig. 3 Membership function of fuzzy hybrid controller

(a) v_1 的隶属度函数 (b) v_2 的隶属度函数
(c) α 的隶属度函数

根据车辆专家知识,遵循“在簧载质量和非簧载质量两者之中,振动得剧烈便被遏制;如果两者均剧烈振动,则同时以同等程度对它们的振动加以遏制”的控制原则,建立 25 条语言规则如下。

R_i : IF v_1 IS O AND v_2 IS V THEN $\alpha = L$

R_{i+1} : IF v_1 IS V AND v_2 IS O THEN $\alpha = L$

R_{i+2} : IF v_1 IS V AND v_2 IS V THEN $\alpha = V$

模糊控制器的解模糊化采用重心法,即

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \mu_c(Z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_c(Z_i)} \quad (4)$$

式中 Z_0 ——得到精确量

Z_i ——模糊混合控制的输入元素

$\mu_c(Z_i)$ —— Z_i 相应隶属度

3 硬件在环仿真平台及车辆参数

利用 Matlab/Real-time Windows Target 模块和研华 PCI-1711 数据采集卡,采用 Intel Pentium 3.0 计算机作为目标机构建硬件在环仿真平台(图 4)。其中自行开发的电控单元(图 5)核心处理器采用 Freescale MC9S12XDP512,该芯片内置 16 路 A/D 输入通道,D/A 转换芯片采用 Analog Devices AD7801。为开展半实物仿真,通过 BDM 模块将在 CodeWarrior 中编制的模糊混合控制策略开发程序下载至该电控单元,并借助 Simulink 开发出如图 6 所示的 1/2 车辆半主动悬架仿真模型。

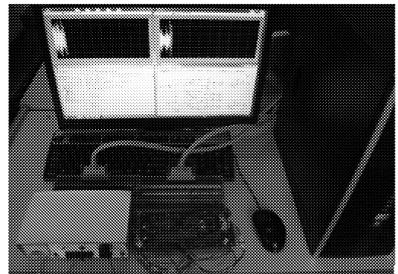


图 4 硬件在环仿真平台实物图

Fig. 4 Photograph of HIL experimental platform

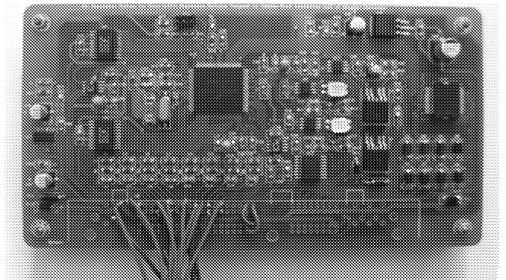


图 5 电控单元实物图

Fig. 5 Photograph of electronic control unit

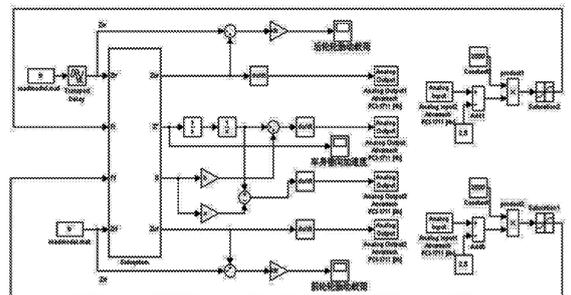


图 6 基于硬件在环的半主动悬架仿真模型

Fig. 6 Simulation model of HIL-based semi-active suspensions

4 自由度 1/2 车辆模型的主要参数如表 1 所示。

4 硬件在环仿真结果与分析

路面模型采用滤波白噪声法^[11],即

表1 车辆半主动悬架模型参数

Tab.1 Parameters of semi-active suspension model

参数	数值
簧载质量 M_s/kg	975.37
前悬架非簧载质量 M_{uf}/kg	98
后悬架非簧载质量 M_{ur}/kg	98
簧载质量俯仰运动的转动惯量 $I_y/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1674
前轮胎垂直刚度 $K_{yf}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	604685.4
后轮胎垂直刚度 $K_{yr}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	985965
前悬架弹簧刚度 $K_{sf}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	45482.2
后悬架弹簧刚度 $K_{sr}/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	52288.2
前悬架阻尼器阻尼系数 $C_{sf}/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	2546.5
后悬架阻尼器阻尼系数 $C_{sr}/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	2480.6
前轮轴心到车身质心距离 a/m	1.1135
后轮轴心到车身质心距离 b/m	1.5415

$$\dot{x}_\tau(t) = -2\pi f_0 x_\tau(t) + 2\pi\sqrt{G_0}v_0 w(t) \quad (5)$$

式中 x_τ ——路面位移

G_0 ——路面不平度系数

v_0 ——车辆行驶速度

$w(t)$ ——均值为零的高斯白噪声

f_0 ——下截止频率

采用路面不平度系数为 $2.56 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{cycle}$, 白噪声功率为 20 dB, 截止频率为 0.1 Hz 的 C 级路面, 车速分别选取典型车速 80 km/h, 设置仿真时间为 10 s, 仿真步长为 0.005 s, 求解器为定步长 ode4, 增益系数 G 为 2500 N·s/m, 在自行开发的电控单元中分别移植天棚控制、地棚控制和模糊混合控制算法, 与已建立的 4 自由度 1/2 车辆半主动悬架模型进行硬件在环仿真, 并采用前轮轮胎动载荷、后轮轮胎动载荷、车身垂向加速度、前悬架动行程和后悬架动行程均方根与最大值分别对天棚控制、地棚控制和模糊混合控制策略对车辆平顺性和道路友好性的影响进行评价, 基于硬件在环的半主动悬架不同控制策略仿真结果如表 2 所示。

由表 2 所示, 采用模糊混合控制策略时, 与天棚控制相比, 前轮轮胎动载荷均方根下降 8.62%, 最大值下降 4.32%, 后轮轮胎动载荷均方根下降 13.33%, 最大值下降 6.24%, 车身垂向加速度均方根增加 6.59%, 最大值增加 3.72%, 前悬架动行程均方根增加 5.79%, 最大值增加 2.45%, 后悬架动行程均方根增加 4.63%, 最大值减小 12.01%; 与地棚控制相比, 前轮轮胎动载荷均方根增加 2.58%, 最大值下降 0.58%, 后轮轮胎动载荷均方根增加 6.74%, 最大值增加 2.11%, 车身垂向加速度均方根减小 25.33%, 最大值减小 23.23%, 前悬架动行

程均方根减小 11.28%, 最大值增加 1.17%, 后悬架动行程均方根减小 13.28%, 最大值减小 18.53%。

表2 基于不同控制策略的仿真结果

Tab.2 Simulation results of different control strategies

评价参数	评价指标	天棚控制	地棚控制	模糊混合控制
前轮轮胎动	均方根	1171.419	1043.534	1070.441
载荷/N	最大值	3565.375	3431.348	3411.315
后轮轮胎动	均方根	1970.319	1599.766	1707.620
载荷/N	最大值	6581.639	5847.445	5971.270
车身垂向加	均方根	0.697	0.995	0.743
速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	最大值	2.284	3.086	2.369
前悬架动行	均方根	3.851	4.592	4.074
程/mm	最大值	13.341	13.509	13.668
后悬架动行	均方根	3.631	4.381	3.799
程/mm	最大值	13.105	14.155	11.532

与天棚控制相比, 模糊混合控制策略可以有效降低车辆前、后轮轮胎动载荷的均方根与最大值, 车身垂向加速度、前悬架动行程与后悬架动行程均方根和最大值增加并不明显; 与地棚控制相比, 模糊混合控制策略可以显著降低车身垂向加速度和前、后悬架动行程, 车辆平顺性明显提高, 而前、后轮轮胎动载荷均方根与最大值变化较小, 道路友好性没有发生明显恶化, 兼顾车辆平顺性与道路友好性。

为进一步分析模糊混合控制策略, 分析了在各种控制策略控制下的前、后轮轮胎动载荷车身垂向加速度和前、后悬架动行程的频谱特性(图 8~12)。

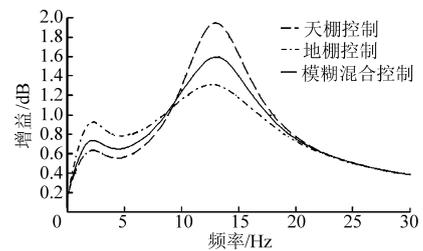


图8 前轮轮胎动载荷幅频特性

Fig.8 Frequency-amplitude characteristics of front tire dynamic load

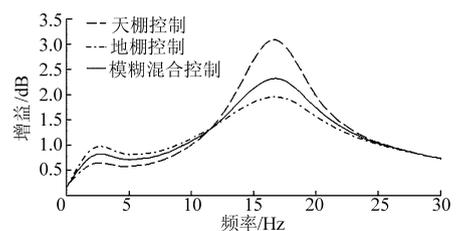


图9 后轮轮胎动载荷幅频特性

Fig.9 Frequency-amplitude characteristics of rear tire dynamic load

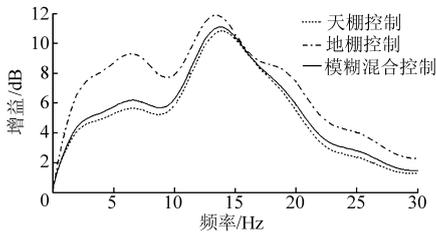


图 10 车身垂向加速度幅频特性

Fig. 10 Frequency-amplitude character of centric acceleration

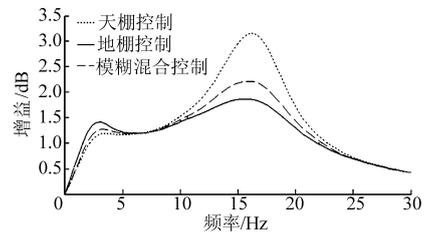


图 12 后悬架动挠度幅频特性

Fig. 12 Frequency-amplitude characteristics of rear suspension deflection

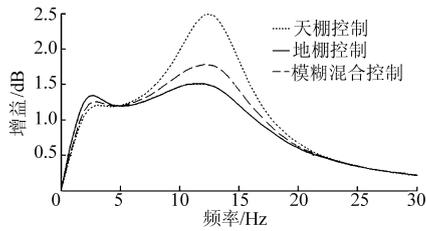


图 11 前悬架动挠度幅频特性

Fig. 11 Frequency-amplitude characteristics of front suspension deflection

由图 8 ~ 12 可知,天棚控制、地棚控制和模糊混合控制策略对前、后轮轮胎动载荷、车身垂向加速度、前、后悬架动行程处于低频共振区和高频共振区时对应频率影响较小。与天棚控制相比,采用模糊混合控制策略时前、后轮轮胎动载荷相对于路面的增益在 9 ~ 18 Hz 频率区间明显降低,道路友好性得到明显改善,与此同时,前、后悬架动行程相对于路面的增益在上述频率范围内亦减低显著;但车身垂

向加速度增益系数峰值稍有增大,车辆平顺性并没有明显恶化。与地棚控制相比,采用模糊混合控制策略时车身垂向加速度增益在所有频率范围内得到显著改善,车辆平顺性得到明显提高,但前、后轮胎胎动载荷增益在高频区稍有增加,证明本文提出的模糊混合控制策略可有效兼顾车辆平顺性与道路友好性,具有较高的实车应用价值。

5 结论

(1) 在建立 4 自由度 1/2 车辆半主动悬架仿真模型基础上,设计了模糊混合控制策略,利用所构建的硬件在环仿真平台开展了半实物仿真。

(2) 以前、后轮轮胎动载荷、车身垂向加速度、前、后悬架动行程的均方根、最大值与幅频特性为参数进行分析,证明基于硬件在环的模糊混合控制策略可以有效兼顾车辆平顺性和道路友好性,具有较高的实车应用可行性。

参 考 文 献

- 李怀璋,余群. 车辆路面计算机仿真系统中的沥青路面应力应变分析[J]. 农业机械学报,2001,32(4):1~3.
Li Huaizhang, Yu Qun. Stress and strain analysis of asphalt surface in a vehicle road simulation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2001,32(4):1~3. (in Chinese)
- 张孝祖,乐薇,陈龙. 阻尼模糊控制在车辆半主动悬架中的应用[J]. 农业机械学报,2004,35(2):5~8.
Zhang Xiaozu, Le Wei, Chen Long. Application of fuzzy control on damping coefficient in vehicle semi-active suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(2):5~8. (in Chinese)
- 陈兵,曾鸣,尹忠俊. 车辆半主动悬架的模糊控制策略设计与仿真研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(2):420~427.
Chen Bing, Zeng Ming, Yin Zhongjun. Research of fuzzy control strategy design and simulation of vehicle semi-active suspension[J]. Journal of System Simulation,2008,20(2):420~427. (in Chinese)
- 李以农,郑玲. 基于磁流变减振器的汽车半主动悬架非线性控制方法[J]. 机械工程学报,2005,41(5):31~36.
Li Yinong, Zheng Ling. Nonlinear control methods of automotive semi-active suspension based on the MR damper[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(5):31~36. (in Chinese)
- 贝绍轶,陈龙. 基于遗传算法的汽车半主动悬架模糊控制器设计[J]. 农业机械学报,2006,37(9):9~12.
Bei Shaoyi, Chen Long. Design of semi-active automobile suspension fuzzy controller based on genetic algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(9):9~12. (in Chinese)
- 陈杰平,冯武堂,郭万山. 整车磁流变减振器半主动悬架变论域模糊控制策略[J]. 农业机械学报,2011,42(5):7~13.
Chen Jieping, Feng Wutang, Guo Wanshan. Whole vehicle magnetorheological fluid damper semi-active suspension variable universe fuzzy control simulation and test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(5):7~13. (in Chinese)

- 5 杨福广,李贻斌,阮久宏,等. 基于扩张状态观测器的路面附着系数实时估计[J]. 农业机械学报,2010,41(8):6~9,15.
Yang Fuguang, Li Yibin, Ruan Jiuhong, et al. Real-time estimation of tire road friction coefficient based on extend state[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):6~9,15. (in Chinese)
- 6 余卓平,高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报,2009,45(5):20~33.
- 7 Tuononen A J. Vehicle lateral state estimation based on measured tyre forces [J]. Sensors, 2009,9(11): 8 761~8 775.
- 8 Nam Kanghyun, Oh Sehoon, Fujimoto Hiroshi, et al. Vehicle state estimation for advanced vehicle motion control using novel lateral tire force sensors[C]//2011 American Control Conference, 2011:4 853~4 858.
- 9 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
- 10 胡丹. 基于双扩展卡尔曼滤波的汽车状态及路面附着系数估计算法研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- 11 Gao Bolin, Chen Hui. State estimation for active safety control of 4WD in-wheel motor electric vehicle [C] // First International Symposium on Future Active Safety Technology Toward Zero-Traffic-Accident, 2011.

(上接第 15 页)

- 7 魏建华,杜恒,方向. 基于 ADAMS/Simulink/AMESim 的油气悬架道路友好性分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):11~17.
Wei Jianhua, Du Heng, Fang Xiang. Road friendliness of interconnected hydro-pneumatic suspension based on ADAMS/Simulink/AMESim[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):11~17. (in Chinese)
- 8 隋树林,于镭,邵巍. 基于 Matlab 的仿真与实时控制/校验系统的设计[J]. 仿真技术,2006,22(12):203~205.
- 9 Agrawal O P, Shabana A A. Application of deformable-body mean axis to flexible multibody system dynamics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1986,56(2):217~245.
- 10 Goncalves F D. Dynamic analysis of semi-active control techniques for vehicle applications [D]. Burrus Hall Blacksburg, VA; Virginia Polytechnic Institute and State University,2001.
- 11 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

欢迎投稿、订阅 2013 年度《排灌机械工程学报》杂志

《排灌机械工程学报》原刊名《排灌机械》,创刊于 1982 年,由中国农业机械学会排灌机械分会主管,中国农业机械学会排灌机械分会和江苏大学流体机械工程技术研究中心(具有国家级重点学科)共同主办,是农业工程类全国中文核心期刊。2009 年以来所发论文全部被 EI 收录。在 2009 年度、2010 年度教育部“科技论文在线优秀期刊”评比中荣获二等奖,2010 年荣获第三届中国高校特色科技期刊奖。

《排灌机械工程学报》坚持社会主义办刊方针,宣传党和国家有关排灌机械行业的方针政策,全面系统地反映专业发展水平,及时、准确地报道新理论、新技术、新方法、新成果和国内外最新研究进展,促进学术交流与合作,推动排灌事业的发展。读者面向国内外专家学者、高校教师和研究生、科研院所研究人员,国内知名院校(包括港、澳、台地区的 30 多个高校和公共图书馆),中央及各省、市水利管理部门、水利科研设计院所,全国大、中型泵类产品生产企业、泵站建设工程等处都能见到本刊。此外,本刊还发行到北美、西欧、澳洲以及东南亚的日本、泰国、新加坡等几十个国家。本刊邀请了来自美、英、德、法、荷、意、澳、日、韩、泰等 10 国的国际流体机械知名专家担任顾问和编委,进一步提升了本刊的国际影响力。

《排灌机械工程学报》主要栏目:综述、泵理论与技术、水利水电工程、流体工程、农业水土工程等。

《排灌机械工程学报》采用国际标准大 16 开版本,全彩印刷,96 页码,月刊,每月 28 日出版,定价:18 元/期。国内订阅:全国各地邮局,邮发代号:28-82;国外订阅:中国国际图书贸易总公司报刊科(北京 399 信箱),邮发代号:BM5945。

地址:江苏省镇江市梦溪园巷 30 号 江苏大学杂志社《排灌机械工程学报》编辑部

邮编:212003 电话:0511-84493098 网址:<http://zss. ujs. edu. cn/pgjx> E-mail:pgjx@ ujs. edu. cn

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告