

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.001

# 车辆惯容器-弹簧-阻尼器半主动悬架模糊控制\*

汪若尘<sup>1</sup> 孟祥鹏<sup>1</sup> 施德华<sup>1</sup> 陈兵<sup>1</sup> 陈龙<sup>1</sup> 席宁<sup>2</sup>

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013; 2. 密歇根州立大学工学院, 东兰辛 48824)

**摘要:** 为了研究惯容器-弹簧-阻尼器(ISD)半主动悬架系统对汽车平顺性和安全性的影响,建立了2自由度车辆ISD半主动悬架模型,采用模糊控制策略,以车身垂直加速度及车身垂直加速度变化率作为模糊控制器的输入信号对ISD半主动悬架系统进行了仿真分析。在此基础上,设计开发了基于dSPACE的半主动悬架模糊控制系统,并进行了台架试验研究,分析了ISD半主动悬架系统在不同车速下对随机输入路面的相应。仿真结果和台架试验结果基本吻合,结果表明:所建立的ISD半主动悬架数学模型正确,采用模糊控制的ISD半主动悬架系统在减少振动,提高汽车行驶平顺性方面要优于ISD悬架。

**关键词:** 车辆 两级串联式 ISD 悬架 模糊控制 半主动悬架 台架试验

**中图分类号:** U463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0001-05

## Fuzzy Control of Vehicle ISD Semi-active Suspension

Wang Ruochen<sup>1</sup> Meng Xiangpeng<sup>1</sup> Shi Dehua<sup>1</sup> Chen Bing<sup>1</sup> Chen Long<sup>1</sup> Xi Ning<sup>2</sup>(1. *Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*2. *College of Engineering, Michigan State University, East Lansing 48824, USA*)

**Abstract:** ISD suspension has been widely studied by scholars, while semi-active control study on three components ISD suspension is still unsatisfactory. To study the influence of ISD semi-active suspension on automobile comfort and safety, a 2-DOF dynamic model for automobile ISD semi-active suspension was established. Simulation analysis adopted fuzzy control method with body vertical velocity and vertical acceleration signals as the fuzzy controller input was carried out on the suspension system. On this basis, a fuzzy control system for this suspension system was developed and designed by dSPACE, and its bench test was performed. The responses of ISD semi-active suspension to random road input at different velocity were analyzed. Simulation results were in agreement with experimental results. The results show that the mathematical model of ISD semi-active suspension is correct, and the ISD semi-active suspension with fuzzy control is superior to ISD suspension in damping suspension vibration as well as in improving vehicle running smoothness.

**Key words:** Vehicle Two-stage series-connected ISD suspension Fuzzy control Semi-active suspension Bench test

### 引言

作为车辆的重要组成部分之一,悬架系统对车辆的操纵稳定性、行驶安全性和乘坐舒适性有着重要的影响。传统的被动悬架由于参数固定,在环

境或车辆自身参数发生变化时,无法保证较好的行驶平顺性,即使采用了优化的方法,其效果也不太理想。

主动悬架通过采用力发生器取代被动悬架的弹性和阻尼元件,可以获得最佳的悬架控制特性。但

收稿日期: 2013-06-07 修回日期: 2013-07-18

\* 国家自然科学基金资助项目(50905078)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2012714)、江苏省333工程资助项目、江苏省六大人才高峰资助项目和江苏省青蓝工程资助项目

作者简介: 汪若尘,副教授,博士,主要从事车辆动态性能模拟与控制研究, E-mail: wrc@ujs.edu.cn

结构复杂,造价昂贵,而结构较简单、造价低廉的半主动悬架则受到广泛重视。目前对于半主动悬架的研究主要集中在采用适当的控制策略控制变阻尼减振器,通过改变减振器的阻尼特性,使其输出合适的阻尼力适应不同道路和行驶状况的需要,从而能有效提高车辆的乘坐舒适性及行驶安全性。半主动悬架在振动控制品质上接近于主动悬架,且结构简单、能量损耗小,在汽车悬架上具有良好的应用前景。

传统的两元件悬架改变车辆性能的幅度有限,近年来,许多学者开始研究惯容器-弹簧-阻尼器(Inerter-spring-damper, ISD)组成的三元件悬架系统<sup>[1-6]</sup>,但还未见三元件悬架系统的半主动控制研究的报道<sup>[7-15]</sup>。本文对基于模糊控制的 ISD 半主动悬架进行理论分析和试验验证,并与 ISD 悬架系统进行对比分析。

## 1 ISD 半主动悬架动力学建模

建立的单轮车辆简化模型如图 1 所示。

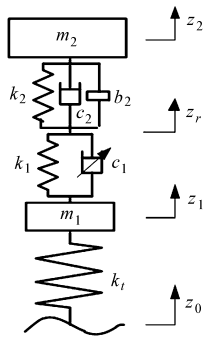


图 1 2 自由度半主动悬架模型

Fig.1 Semi-active suspension model of 2 DOF

根据模型,建立其动力学方程为

$$\begin{cases} m_2 \ddot{z}_2 = -k_2(z_2 - z_r) - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_r) - b_2(\ddot{z}_2 - \ddot{z}_r) \\ m_1 \ddot{z}_1 = k_1(z_r - z_1) + c_1(\dot{z}_r - \dot{z}_1) - k_t(z_1 - z_0) - F_c \\ k_2(z_2 - z_r) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_r) + b_2(\ddot{z}_2 - \ddot{z}_r) + F_c = \\ k_1(z_r - z_1) + c_1(\dot{z}_r - \dot{z}_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $m_1$ ——簧下质量  $m_2$ ——簧上质量

$k_1$ ——第 1 级悬架刚度

$k_2$ ——第 2 级悬架刚度

$c_1$ ——第 1 级悬架阻尼系数

$c_2$ ——第 2 级悬架阻尼系数

$b_2$ ——惯容器惯容系数

$k_t$ ——轮胎刚度  $z_0$ ——路面位移

$z_1$ ——簧下质量位移

$z_2$ ——簧上质量位移

$z_r$ ——悬架级间公共端位移

$F_c$ ——控制器的输出

取系统变量和输出变量为

$$\mathbf{x} = (z_2 - z_r, z_r - z_1, z_1 - z_0, \dot{z}_2, \dot{z}_r, \dot{z}_1)^T$$

$$\mathbf{z} = (\dot{z}_2, k_t(z_1 - z_0), z_2 - z_1, z_2 - z_r, z_r - z_1)^T$$

则系统微分方程的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{B}_2F_c \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}F_c \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{k_1}{m_2} & 0 & 0 & -\frac{c_1}{m_2} & \frac{c_1}{m_2} \\ \frac{k_2}{b_2} & -\frac{\alpha k_1}{b_2 m_2} & 0 & \frac{c_2}{b_2} & -\frac{\beta}{b_2 m_2} & \frac{\alpha c_1}{b_2 m_2} \\ 0 & \frac{k_1}{m_1} & -\frac{k_t}{m_1} & 0 & \frac{c_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = [0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{B}_2 = [0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{m_2} \ \frac{\alpha}{m_2 b_2} \ -\frac{1}{m_1}]^T$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_1}{m_2} & 0 & 0 & -\frac{c_1}{m_2} & \frac{c_1}{m_2} \\ 0 & 0 & k_t & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = [\frac{1}{m_2} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\alpha = b_2 + m_2 \quad \beta = \alpha c_1 + m_2 c_2$$

## 2 模糊控制半主动悬架仿真

选取参考模型和 ISD 悬架模型的车身垂直加速度信号  $e$  及车身垂直加速度变化率  $e_c$  作为模糊控制器的输入信号,输出信号为可变阻尼减振器的阻尼力  $U$ 。

对于输入、输出变量,都采用 7 个语言模糊子集来确定,即 {NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}。为避免出现失控现象,本控制器车身垂直加速度信号  $e$  论域设为  $\{-6, 6\}$  及车身垂直加速度变化率  $e_c$  的论域设为  $\{-6, 6\}$ ,控制力的论域设为  $\{-7, 7\}$ 。输入变量  $e$  及  $e_c$  输出变量  $u$  的模糊子集采用正弦隶属函数。模糊控制规则表参照文献 [7~8]。仿真模型如图 2 所示。

设车辆分别以  $u = 50 \text{ km/h}$  和  $u = 80 \text{ km/h}$  的速

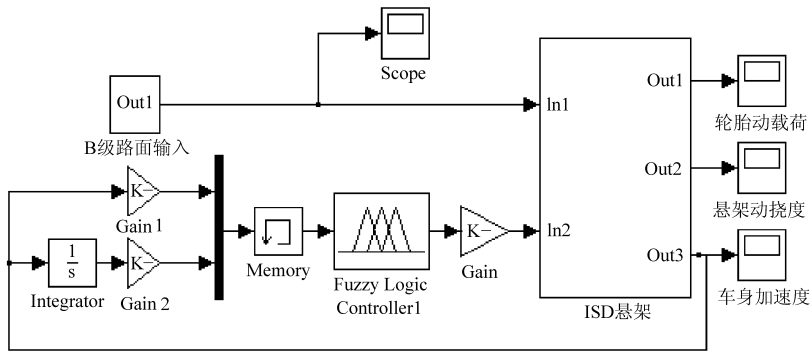


图 2 ISD 半主动悬架控制系统仿真模型

Fig. 2 Control system simulation model of ISD semi-active suspension

度驶过 B 级路面,所用车型相关参数为:簧下质量 45.5 kg,簧上质量 317.5 kg,轮胎刚度 192 kN/m,惯容器惯容系数 332 kg,第 1 级悬架刚度 22 kN/m,

第 2 级悬架刚度 15 kN/m,第 1 级悬架阻尼系数 1.4 kN·s/m,第 2 级悬架阻尼系数 2.8 kN·s/m。仿真结果如图 3 及表 1 所示。

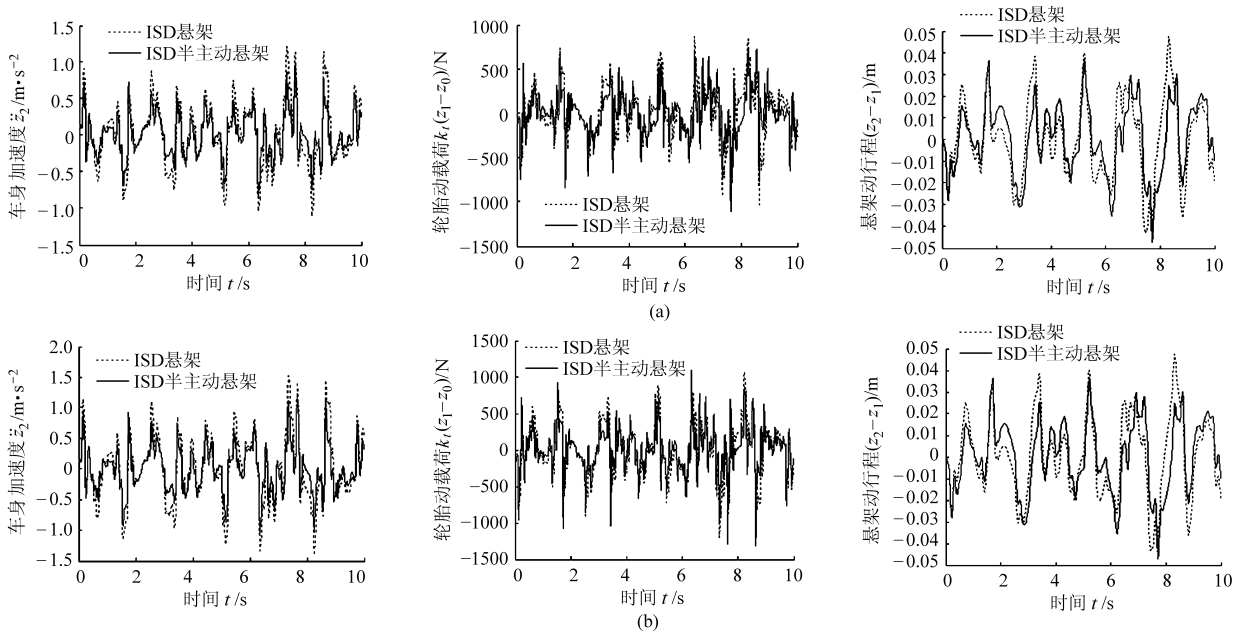


图 3 系统随机响应

Fig. 3 Random responses of system

(a)  $v = 50 \text{ km/h}$  (b)  $v = 80 \text{ km/h}$

表 1 悬架系统响应均方根

Tab. 1 RMS values of suspension system

车速 /km·h <sup>-1</sup>	悬架 类型	车身加速度	轮胎动	悬架动行程
		均方根 /m·s <sup>-2</sup>	载荷均 方根/N	均方根 /m
50	被动悬架	0.442 0	318.004 6	0.015 3
	半主动悬架	0.308 0	262.989 4	0.013 4
80	被动悬架	0.561 4	402.526 5	0.019 4
	半主动悬架	0.394 4	334.327 8	0.016 8

结合图 3 和表 1 可知,在同一时间段、相同工况下车速为 50 km/h 时,与 ISD 悬架相比,ISD 半主动悬架,车身垂向振动加速度有显著改善,其均方根减小了 30.6%,悬架动行程均方根减小了 12.4%,说

明车辆行驶平顺性得到了明显改善;在轮胎动载荷这一衡量车辆操纵稳定性的指标上也有明显降低,均方根减小了 17.3%,说明操纵稳定性也得到明显提高。在车速为 80 km/h 时,与被动悬架相比,车身垂向振动加速度均方根减小了 29.7%,悬架动行程均方根值减小了 13.4%,轮胎动载荷均方根减小了 17%,说明在不同工况下,ISD 半主动悬架仍保持良好性能,协调了整车综合性能。

### 3 模糊控制系统设计

控制系统是 ISD 半主动悬架系统的核心,决定了 ISD 半主动悬架系统的性能。基于 dSPACE 实时系统开发的模糊控制系统工作原理如图 4 所示<sup>[9-10]</sup>。



图4 控制系统工作原理

Fig. 4 Working principle of control system

基于 dSPACE 实时系统对 ISD 半主动悬架进行半实物仿真试验流程图如图 5 所示。

## 4 试验

台架试验系统主要包括 INSTRON 8800 数控液压伺服激振试验台模拟路面输入设备,加速度传感器和位移传感器,数据采集系统,基于 dSPACE 的模糊控制器和 ISD 半主动悬架系统。

由于试验条件所限,试验所用车型簧上质量为 390 kg,其他参数与仿真时所用参数相同。

在激振台上模拟随机路面输入,分别对 ISD 悬架系统和 ISD 半主动悬架系统进行台架试验。悬架

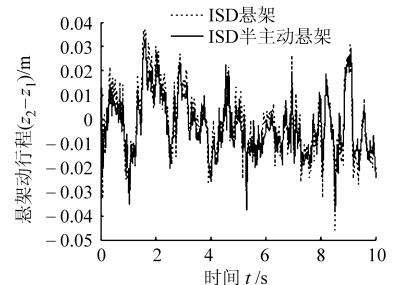
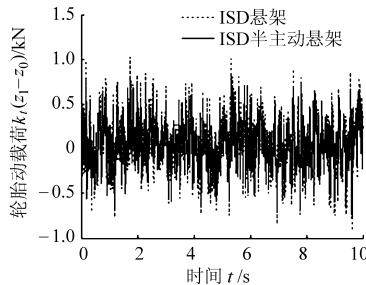
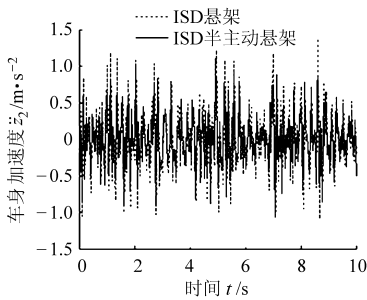


图6 随机激励响应试验结果

Fig. 6 Test results of random excitation response

表2 悬架系统响应均方根

Tab. 2 RMS values of suspension system

悬架类型	车身加速度	轮胎动载荷	悬架动行程
	均方根	均方根	均方根
	/m·s <sup>-2</sup>	/N	/m
ISD 悬架	0.459 7	336.303 6	0.014 5
ISD 半主动悬架	0.381 6	292.289 4	0.013 8

由图 6 和表 2 可知,车身加速度、轮胎动载荷和悬架动行程分别减小了 16.99%、13.09%、4.83%,

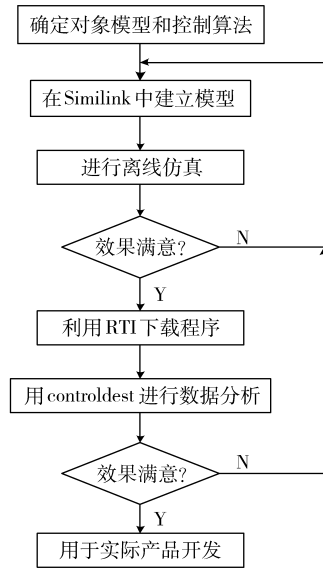


图5 dSPACE 试验流程图

Fig. 5 Flowchart of dSPACE test

系统在车速为 50 km/h 时的响应试验结果如图 6 和表 2 所示。

可见,ISD 半主动悬架改善了车辆的乘坐舒适性。同时,轮胎动载荷大小也有所改善,说明 ISD 半主动悬架也提高了车辆的行驶安全性。

## 5 结论

(1) 所建的 ISD 半主动悬架数学模型正确,所设计的模糊控制系统可靠。

(2) 仿真结果和台架试验结果基本吻合,模糊控制的 ISD 半主动悬架性能明显优于 ISD 悬架。

## 参考文献

- Smith M C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235 ~ 257.
- Smith M C, Wang Fucheng. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[C]//42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA, 2003;2 258 ~ 2 263.
- Wang Fucheng, Liao Minkai, Liao Bohuai, et al. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(7):805 ~ 830.
- 陈龙,张孝良,汪若尘. 应用惯性蓄能器的车辆悬架:中国,200810123830.8[P]. 2008-12-24.  
Chen Long, Zhang Xiaoliang, Wang Ruochen. Vehicle suspension employing inerter:China, 200810123830.8[P]. 2008-12-

24. (in Chinese)
- 5 张孝良. 蓄能悬架系统及其试验[D]. 镇江:江苏大学, 2009.  
Zhang Xiaoliang. Suspensions employing inerter and its bench test[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 6 陈龙, 张孝良, 江浩斌, 等. 基于机电系统相似性理论的蓄能悬架系统[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1 248 ~ 1 250.  
Chen Long, Zhang Xiaoliang, Jiang Haobin, et al. Vehicle suspension system employing inerter based on electrical-mechanical analogy theory[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1 248 ~ 1 250. (in Chinese)
- 7 陈龙, 李德超, 周孔亢. 自适应模糊控制技术在半主动悬架控制中的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4): 5 ~ 8.  
Chen Long, Li Dechao, Zhou Kongkang. Application of adaptive fuzzy control in vehicle semi-active suspension system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4): 5 ~ 8. (in Chinese)
- 8 严天一, 闫海敬, 侯兆萌, 等. 车辆半主动悬架粒子群模糊混合控制策略[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 1 ~ 7.  
Yan Tianyi, Yan Haijing, Hou Zhaomeng, et al. PSO-fuzzy-hybrid control strategy of semi-active suspensions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 1 ~ 7. (in Chinese)
- 9 于显利. 车辆主动悬架集成控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.  
Yu Xianli. The research of integrated control strategy of the vehicle active suspension[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 10 王伟才, 王银燕. 基于 dSPACE 的涡轮增压器动态性能实时仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3 559 ~ 3 563.
- 11 Papageorgiou C, Smith M C. Positive real synthesis using matrix inequalities for mechanical networks: application to vehicle suspension[J]. IEEE Trans. Control System Technology, 2006, 14(3): 423 ~ 435.
- 12 江浩斌, 耿建涛, 张孝良, 等. 基于虚拟样机模型的车辆蓄能悬架联合仿真研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 221 ~ 223.  
Jiang Haobin, Geng Jiantao, Zhang Xiaoliang, et al. Study on co-simulation of vehicle suspension system employing inerter based on virtual prototype model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 221 ~ 223. (in Chinese)
- 13 李川, 王时龙, 张贤明, 等. 一种含螺旋飞轮转换器的悬架的振动控制性能分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 96 ~ 100.  
Li Chuan, Wang Shilong, Zhang Xianming, et al. Analysis on vibration control performance of a novel vehicle suspension with spiral flywheel motion transformer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 96 ~ 100. (in Chinese)
- 14 张孝祖, 武鹏. 装有动力吸振器的汽车悬架性能分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2004, 25(5): 389 ~ 392.
- 15 孙鹏远. 基于 LMI 优化的主动悬架多目标控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.  
Sun Pengyuan. Multi-objective control to active suspensions based on LMI optimization[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 10 页)

- 14 汪若尘, 江浩斌, 张孝良, 等. 阻尼非线性半主动悬架的建模与控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 14 ~ 17.  
Wang Ruochen, Jiang Haobin, Zhang Xiaoliang, et al. Modeling and control of semi-active suspension with nonlinear damping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 14 ~ 17. (in Chinese)
- 15 王东亮, 管继富, 王文瑞. 半主动油气悬架系统模糊控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 23 ~ 26.  
Wang Dongliang, Guan Jifu, Wang Wenrui. Fuzzy control system for semi-active hydro-pneumatic suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 23 ~ 26. (in Chinese)
- 16 江洪, 李坤, 周文涛, 等. ECAS 系统控制模式及控制策略[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 224 ~ 231.  
Jiang Hong, Li Kun, Zhou Wentao, et al. Control mode and control strategy in ECAS system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 224 ~ 231. (in Chinese)
- 17 马然, 朱思洪, 伊力达尔, 等. 拖拉机前悬架单出杆磁流变减振器研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 28 ~ 33.  
Ma Ran, Zhu Sihong, Yi Lidaer, et al. Development of single outstretch pole magnetorheological damper on tractor front suspension[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 28 ~ 33. (in Chinese)
- 18 郭晓璐, 余卓平, 黄宗益, 等. 频域快速调节半主动悬架—实用的改善汽车舒适性途径[J]. 上海汽车, 1998(11): 1 ~ 4.
- 19 汪若尘, 陈兵, 张孝良, 等. 车辆蓄能悬架系统仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 1 ~ 4.  
Wang Ruochen, Chen Bing, Zhang Xiaoliang, et al. Simulation and experiment of vehicle inerter suspension system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 1 ~ 4. (in Chinese)