

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0005.001

# 基于模糊控制的磁流变减振器半主动悬架 系统仿真分析\*

姚行艳, 胡力月, 田 雨

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

**摘 要:**汽车悬架是汽车车身与车轮间连接的装置,它能够有效减少路面不平坦带来的振动。为了改善汽车行驶时的平顺性和操作系统的稳定性,针对汽车 1/4 半主动悬架模型,采用模糊控制方法,利用 MATLAB/Simulink 研究了不同车速及路面等级对控制系统的影响。结果表明:模糊控制能够减小路面不平坦引起的汽车悬架振动,提高行驶安全性、驾驶稳定性和乘坐舒适性。

**关键词:**磁流变减振器;半主动悬架;模糊控制;Matlab/Simulink

**中图分类号:**U463.836

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-058X(2020)05-0001-07

## 0 引 言

随着社会的进步和科学的发展,人们对汽车的安全性、操作稳定性和乘坐舒适性要求越来越高。悬架是汽车车身与车轮之间作连接的传力机件,它是保证汽车行驶安全和乘客乘车舒适的重要部件,因此,汽车悬架系统成为人们广泛关注的研究对象。目前,汽车悬架主要分为主动悬架、半主动悬架、被动悬架三大类。被动悬架中弹性元件的刚度和阻尼元件的阻尼系数设计好后就不可更改,因此,被动悬架在不同路面上难以达到有效的减振效果。主动悬架是通过外界能量输入实现根据实时路况来减小汽车振动,但成本高,结构复杂。半主动悬架因其结合了前两者的优点,耗能低、稳定性高、可靠性好、结构简单,所以被广泛用于汽车悬架

系统。

汽车磁流变减振器半主动悬架系统因其对汽车行驶时复杂多变的外界条件适应性强成为人们研究的热点问题<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外学者对汽车磁流变减振器半主动悬架系统的控制策略主要有  $H_\infty$  控制、自适应控制、滑膜控制及模糊控制<sup>[4-5]</sup>。Du<sup>[6]</sup>等采用  $H_\infty$  控制对半主动悬架模型进行控制,实验结果表明该控制方法能够较好控制弹簧载荷质量垂向加速度,简单易行,可改善汽车悬架性能;Venhevens<sup>[7]</sup>采用自适应控制策略控制汽车半主动悬架系统,研究结果表明该系统在低频和高频时性能好,但一旦外界冲击过大会导致系统各项参数变化较大,使得系统鲁棒性变差;Morimoto<sup>[8]</sup>将滑膜控制器运用到商务车半主动悬架系统中,实验结果表明采用该控制方法可以得到预期的控制性能要求。但目前对于滑膜控制的理论知识较少,所以将该控

收稿日期:2020-01-18;修回日期:2020-03-03.

\* 基金项目:国家自然科学基金(51605061);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900808);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(CSTC2017JCYJAX0183).

作者简介:姚行艳(1984—),女,湖北随州人,副教授,博士,从事智能材料与振动控制研究.

制方法控制汽车悬架还有待深入研究<sup>[9-10]</sup>。模糊控制是利用人的经验,建立模糊规则库,它不需要控制对象建立精确的模型,适合复杂的非线性系统。对磁流变减振器半主动悬架系统采用模糊控制策略能够减小悬架系统建模工作量,而且模糊控制器结构简单,它不依赖于控制对象<sup>[11]</sup>。

基于磁流变减振器和半主动悬架系统原理,建立了磁流变减振器半主动悬架动力学模型;然后针对该系统设计模糊控制器,采用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型;最后,在随机路面下对整个系统进行仿真。分析得出模糊控制减振效果更好,更能满足人们对悬架性能指标的要求。

## 1 汽车半主动悬架系统模型

### 1.1 二自由度 1/4 汽车半主动悬架模型

由于整车系统的复杂性,导致难以建立精确的整车模型。本文对整车七自由度汽车模型进行简化。将车厢、底盘和载荷视为只有质量的刚体,轮胎阻尼力相对悬架阻尼力很小,可以忽略。建立如图 1 所示的二自由度 1/4 汽车半主动悬架模型<sup>[12]</sup>。

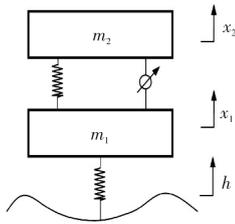


图 1 二自由度 1/4 汽车半主动悬架模型

Fig. 1 1/4 semi-active suspension model with freedom

运用牛顿第二定律,根据图 1 建立二自由度 1/4 汽车动力学模型:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(h - x_1) + k_2(x_2 - x_1) + F \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) - F \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $m_2$  为汽车车身质量即簧载质量 (kg);  $m_1$  为汽车车轮质量即簧下质量 (kg);  $k_2$  为弹簧刚度

(N/m);  $k_1$  为车轮刚度 (N/m);  $F$  为磁流变减振器阻尼力 (N);  $x_1$  为簧下质量垂向位移 (m);  $x_2$  为簧载质量垂向位移 (m);  $h$  为路面激振位移 (m);  $\dot{x}_1$  为簧下质量垂向加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $\ddot{x}_2$  为簧载质量垂向加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。

### 1.2 磁流变减振器力学模型

当减振器速度与加速度反向时,不同速度存在不同阻尼特性,导致减振器在整个速度范围内存在滞回环特性。滞回环的大小与速度反向时的加速度大小有关。因此,需在基本的 Bouc-Wen 模型中加入加速度,体现高速时的滞回特性。同时,考虑实际减振器阻尼力特性曲线存在一定的偏置<sup>[13]</sup>,因此,可通过添加减振器内部摩擦力及减振器蓄能器的刚度得到修正的 Bouc-Wen 模型。

修正的 Bouc-Wen 模型具有复杂的非线性特性,采用参数识别的方法得知  $n=2$  时仿真出的曲线越圆滑。在控制电流  $0 \leq I \leq 1\text{A}$  时最大阻尼力  $F$  与  $I$  成二次函数关系,且  $A$  是与最大阻尼力相关的比例系数,所以可认为  $A$  与  $I$  成二次函数关系:

$$A = P_1 I^2 + P_2 I + P_3 \quad (0 \leq I \leq 1\text{A}) \quad (2)$$

则修正的 Bouc-Wen 模型如下:

$$F = c_0 \dot{x} + \alpha z + q_1 \dot{x} + q_2 x + f_0 \quad (3)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| |z| |z|^{n-1} \beta x |z|^n + (P_1 I^2 + P_2 I + P_3) \dot{x} \quad (4)$$

其中,  $F$  为磁流变减振器阻尼力 (N);  $c_0$  为磁流变材料屈服后黏性系数 (pa/s);  $\dot{x}$  为激励速度 (m/s);  $\alpha$  为滞变力在减振器总阻尼力中所占比例调节参数;  $z$  为滞变位移 (m);  $q_1$  为减振器塑性阶段滞回环宽度调节参数;  $\dot{x}$  为激励加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $q_2$  为单出杆减振器蓄能器的刚度 (N/m);  $X$  为激励位移 (m);  $f_0$  为减振器内部摩擦力 (N);  $\gamma$  为与滞回环宽度相关的调节参数;  $n$  为曲线圆滑系数;  $\beta$  为与滞回环高度相关的调节参数;  $A$  为与最大阻尼力相关的比例系数;  $P_1, P_2, P_3$  为多项式系数。

表 1 修正 Bouc-Wen 模型参数

Table 1 Modification of Bouc-Wen model parameters

$c_0$	$\alpha$	$q_1$	$q_2$	$f_0$	$\gamma$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\beta$
1 331	2 756.93	-6.79	991.01	-118.6	11 232.56	843.8	579.5	-42.5	2 187.11

### 1.3 磁流变减振器半主动悬架系统仿真模型

结合修正 Bouc-Wen 模型和线性半主动悬架系统,构建磁流变半主动悬架系统模型。其中 Bouc-Wen 模型中激励位移  $x$  即为半主动悬架系统中的汽车车身与车架的位移差( $x_1-x_2$ ),整个悬架系统可表示为

$$\begin{cases} F = c_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + \alpha z + q_1(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) + q_2(x_1 - x_2) + f_0 \\ \dot{z} = -\gamma |(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)| |z| |z|^{n-1} \beta (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) |z|^n + \\ (P_1 F^2 + P_2 I + P_3)x(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_1 \dot{x}_1 = k_1(h - x_1) + k_2(x_2 - x_1) + F \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) - F \end{cases} \quad (5)$$

同时,选择路面不平激励  $h$  和减振器阻尼力  $F$  作为半主动悬架系统的输入,基于此微分方程在 Simulink 中建立模型,选取车辆数据如表 2 所示。

表 2 选取的车辆数据

Table 2 Selected vehicle's data

$m_2/\text{kg}$	$m_1/\text{kg}$	$k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_0$
492.25	40	238 145	16 021	1 419.48

## 2 基于模糊控制的半主动悬架系统仿真

以磁流变半主动悬架为研究对象,将半主动悬架的输出作为反馈回路中控制器的输入,而控制器输出控制电流作为整个悬架系统的输入,在路面激励下同系统状态一起控制悬架的性能达到最优。设计模糊控制器流程如图 2 所示。

本文从多个方面考虑选择了二维模糊控制器,其中包括两个输入变量和一个输出变量。选取了车身加速度  $a$  作为一个输入变量,车身和车轮的速度差  $v$  作为另一个输入变量,根据建立的磁流变减振器 Bouc-Wen 模型,控制电流  $I$  为输出变量。

通过试验,本文选取车身加速的基本论域为  $[-20, 20]$ ,减振器两端速度差的基本论域为  $[-6, 6]$ ,输入变量的语言变量均为 {负大 PB、负小 PS、零 Z、正小 NS、正大 NB};控制电流的基本论域为  $[0, 0.45]$ ,其语言变量为 {小 S、中 M、大 H};车身加速

度的模糊论域为  $\{-n_1, -n_1 + 1, \dots, 0, \dots, n_1 - 1, n_1\}$ ;速度差的模糊论域为  $\{-n_2, -n_2 + 1, \dots, 0, \dots, n_2 - 1, n_2\}$ ;输出变量的模糊论域为  $\{0, 1, \dots, n_3 - 1, n_3\}$ ,其中选择  $n_1 = n_2 = 6, n_3 = 3$ 。则有输入输出变量的量化因子为

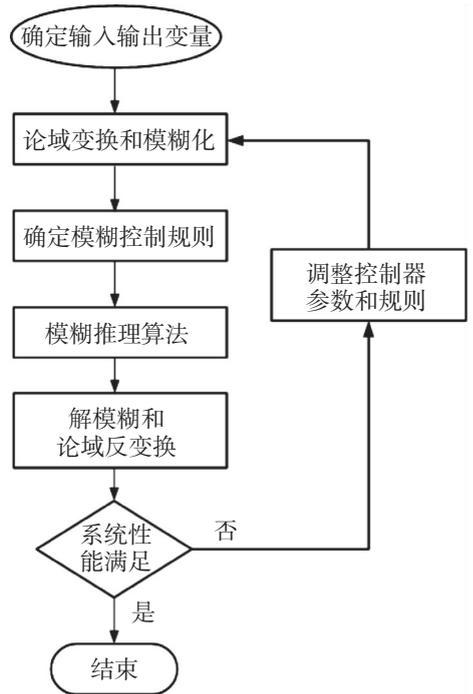


图 2 模糊控制器流程图

Fig. 2 Flow chart of fuzzy controller

车身加速度  $a$  的量化因子:

$$k_a = \frac{n_1}{a_{\max}} = \frac{6}{20} = 0.3 \quad (6)$$

减振器两端速度差  $v$  的量化因子:

$$k_v = \frac{n_2}{v_{\max}} = \frac{6}{6} = 1 \quad (7)$$

控制电流  $I$  的量化因子:

$$k_i = \frac{I_{\max}}{n_3} = \frac{0.45}{3} = 0.15 \quad (8)$$

为了方便计算,选择三角形函数作为输入输出变量的隶属度函数,采用重心法进行模糊法求解。在设计控制器规则时做如下考虑:

1) 当  $v > 0$  时,减振器做伸长运动,此时阻尼力应较大,减振器起主要减振作用。

2) 当  $v < 0$  时,减振器做压缩运动,此时阻尼力应较小,弹簧弹性可以得到充分发挥。

此外,车身加速度应尽可能小且保证轮胎动载荷、悬架动行程在有效范围内。基于以上设计原则,设计出模糊控制规则表(表 3)。

表 3 模糊控制规则表

Table 3 Regulation of fuzzy control

$a \backslash v$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	S	S	H	H	H
NS	S	S	M	M	M
Z	M	S	S	S	S
PS	M	M	S	S	S
PB	H	M	S	S	S

### 3 基于模糊控制的半主动悬架系统仿真结果

基于半主动悬架,在 simulink 中建立的磁流变液阻尼器子系统如图 3 所示。在此基础之上,建立了基于模糊控制的磁流变液阻尼器半主动悬架系统的仿真模型(图 4)。其中,路面激励采用滤波白噪声。通过观察悬架系统 3 个性能指标(out1 为车身加速度,out2 为车身速度,out3 为车身位移),评价模糊控制下该悬架系统的减振能力。在 Matlab/Simulink 中搭建模糊控制半主动悬架系统的仿真模型,如图 4 所示。

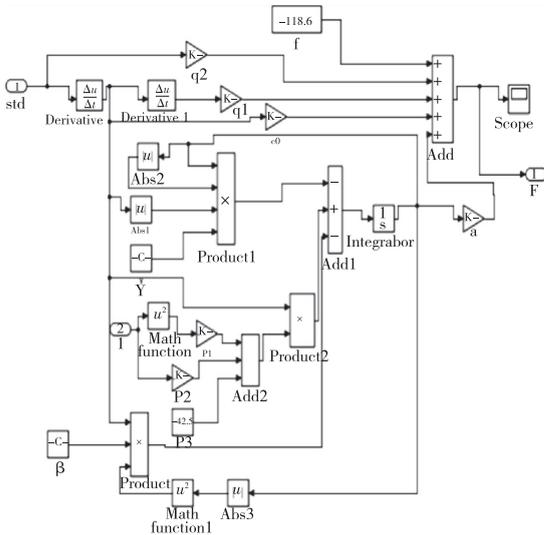


图 3 磁流变减振器子系统

Fig. 3 Subsystem of magneto-rheological damper

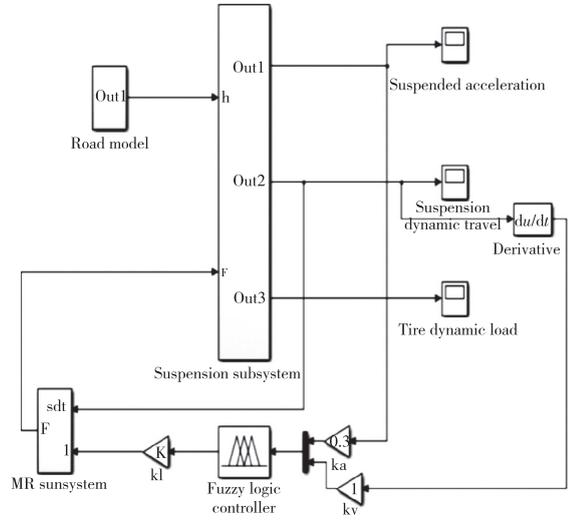
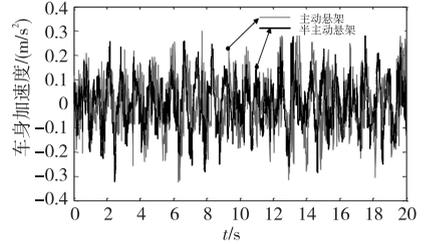


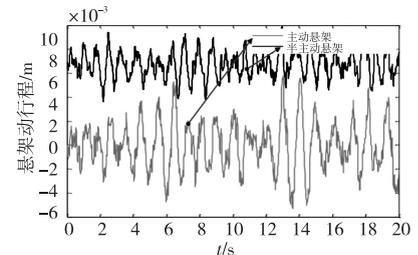
图 4 基于模糊控制的磁流变减振器半主动悬架系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model for semi-active suspension of magneto-rheological damper based on fuzzy control

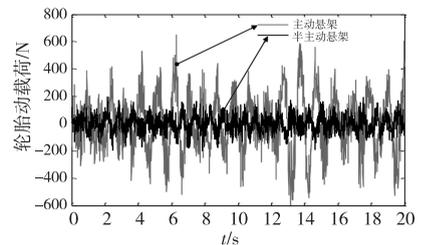
基于模糊控制理论,建立被动悬架模型,通过不同路面、不同速度将模糊控制系统与被动悬架进行仿真对比,分析模糊控制的控制效果(图 5—图 7)。



(a) 车身加速度



(b) 悬架动行程



(c) 轮胎动载荷

图 5 10 m/s, A 级路面激励时域响应

Fig. 5 10 m/s, grade A road surface excitation time-region response

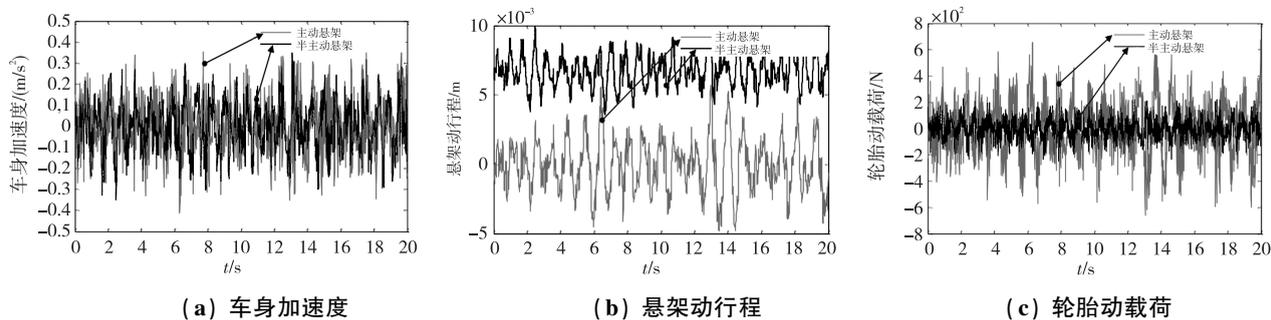


图 6 20 m/s,A 级路面激励时域响应

Fig. 6 20 m/s, grade A road surface excitation time-region response

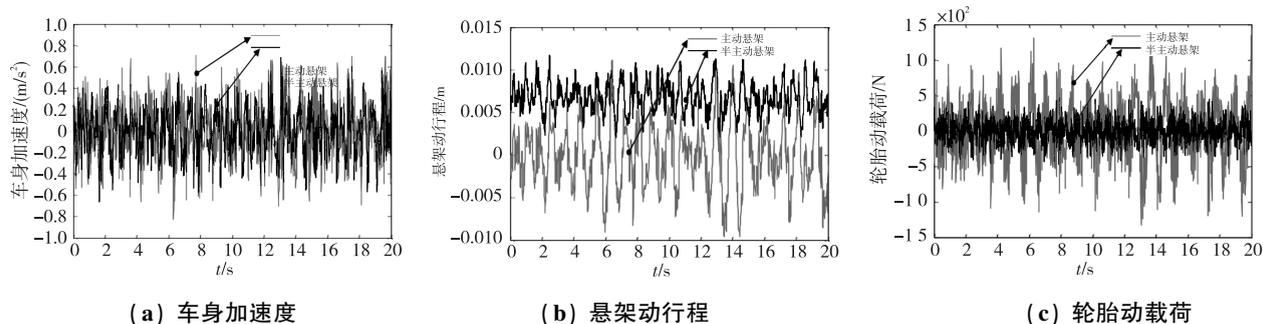


图 7 20 m/s,B 级路面激励时域响应

Fig. 7 20 m/s, grade B road surface excitation time-region response

由图 5—图 7 可知,采用不同汽车速度和路面等级对悬架系统仿真发现,模糊控制下车身加速度和轮胎动载荷均小于被动悬架。车身速度分别为 10 m/s 和 20 m/s 时,对于不同的路面等级,轮胎动载荷变化不明显。此外,模糊控制下悬架动行程均相对于原点向上移动了一段距离,其原因是本文采用了修正的 Bouc-Wen 模型,该模型加入了蓄能刚度和减振器自身摩擦力,使得减振器阻尼力曲线相对于原点向上移动了一段距离。该阻尼力作用在半主动悬架系统中会导致悬架动行程向上移动一段距离,但加了偏置之后的修正 Bouc-Wen 模型更能接近实际减振器的作用效果。

根据表 4 和表 5 可知,模糊控制下车身加速度和轮胎动载荷相对于被动悬架分别减小 10.8%, 70.36%; 18.27%, 61.97%。因此,模糊控制对车身加速度和轮胎动载荷的抑制能力更好,能有效改善乘坐舒适性和驾驶安全性,尤其是轮胎动载荷的抑制效果非常明显。

综上所述,模糊控制下的悬架动行程均大于被动悬架,表明模糊控制不能改善汽车行驶平顺性,模糊控制下不同路面和不同车身速度下的悬架动行程差距不大。基于以上分析,模糊控制比被动悬架的控制效果更好,总体上改善了汽车悬架的性能。

表 4 悬架各性能均方根值(10 m/s,A 级路面)

Table 4 Mean square root value of each suspension property

悬架	车身加速度(m/s <sup>2</sup> )	悬架动行程(m)	轮胎动载荷(N)
被动	0.111 1	0.002 0	202.492 4
半主动	0.099 1	0.006 8	60.021 7

表 5 悬架各性能均方根值(20 m/s,A 级路面)

Table 5 Mean square root value of each suspension property

悬架	车身加速度(m/s <sup>2</sup> )	悬架动行程(m)	轮胎动载荷(N)
被动	0.262 1	0.003 8	422.373 0
半主动	0.214 2	0.007 0	160.620 2

## 4 结 论

对基于模糊控制的磁流变减振器半主动悬架进行仿真分析,并将结果与被动悬架进行对比得出:

模糊控制能够有效地减小车身加速度和轮胎动载荷,其中对轮胎动载荷的抑制效果明显,能有效改善乘坐舒适性和驾驶安全性。汽车车身速度的变化对车身加速度影响不大,轮胎载荷对于路面变化不敏感。

在模糊控制下的悬架动行程均大于被动悬架,模糊控制并不能改善汽车的平顺性,说明悬架性能指标是相互约束的,不能同时达到最优。模糊控制下不同路面和速度下的悬架动行程几乎不变,表明基于模糊控制算法的悬架动行程对速度和路面变化均不敏感。模糊控制控制减振效果更好,能够综合改善悬架系统的性能。

### 参考文献(References):

- [1] 许善珍,赵钱. 基于磁流变减振器的汽车半主动悬架控制研究[J]. 拖拉机与农用运输车,2010,37(1): 8—9  
XU S Z, ZHAO Q. Control Technology of Vehicle Semi-active Suspension Based on MRF Damper [J]. Tractor and Agricultural Transport Vehicle, 2010,37(1):8—9 (in Chinese)
- [2] 余森. 汽车磁流变半主动悬架控制系统研究[D]. 重庆:重庆大学,2003  
YU M. Research on the Control System of Automobile Semi-active Suspension Based on MRF [D]. Chongqing: Chongqing University,2003(in Chinese)
- [3] 王明娟. 变参数磁流变阻尼器动力学特性与半主动控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018  
WANG M X. Research on Dynamic Characteristics and Semi-active Control of Variable Parameter MRF Damper [D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2018(in Chinese)
- [4] 姚嘉伶,蔡伟义,陈宁. 汽车半主动悬架系统发展状况[J]. 汽车工程,2006,28(3):276—280  
YAO J L, CAI W Y, CHEN N. A Review on the Development Status of Automotive Semi-active Suspension Systems[J]. Automotive Engineering,2006,28(3):276—280 (in Chinese)
- [5] 杨金霞,陈宁,姚嘉凌,等. 车辆非线性半主动悬架的模态跟踪变结构控制[J]. 南京林业大学(自然科学版),2017(1):42—46  
YANG J X, CHEN N, YAO J L, et al. Variable Structure Model Following Control for Nonlinear Semi-active Suspension in Vehicle [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017(1):42—46 (in Chinese)
- [6] DU H, SZE K Y, LAM J. Semi-active  $H_{\infty}$  Control of Vehicle Suspension with Magneto-rheological Dampers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3—5): 981—996
- [7] VENHOVENS P J T. The Development and Implementation of Adaptive Semi-active Suspension Control[J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(1): 211—235
- [8] MORIMOTO Y, SUZUKI N, KANEKO Y, et al. Vibration Control of Relative Tool-spindle Displacement for Computer Numerically Controlled Lathe with Pipe Frame Structure [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(4):1—4
- [9] 樊登柱. 车辆磁流变半主动悬架控制系统仿真及试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2007  
FAN D Z. The Simulation and Test Research on the Control System of Semi-active Suspension Equipped MR Damper[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University, 2007 (in Chinese)
- [10] UWE R, OSKAR V S. Optimal and Robust Damping Control for Semi-active Vehicle Suspension [C]//Pro. 5th Euromech Nonlinear Dynamics Conference, 2005: 125—136
- [11] 汪若尘,陈龙,江浩斌,等. 模糊控制半主动悬架的试验研究[J]. 兰州理工大学学报,2005,31(4): 49—51  
WANG R C, CHEN L, JIANG H B, et al. Experiment

- Investigation of Fuzzy Control of Semi-active Suspension[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(4):49—51 (in Chinese)
- [12] 刘前结. 基于 MRD 的 1/4 车辆半主动悬架系统混合控制研究[D]. 上海:上海华东交通大学,2018
- LIU Q J. Research on 1/4 Vehicle Semi-active Suspension Mixed Control Based on MRD [D]. Shanghai:Shanghai East China Transportation University, 2018 (in Chinese)
- [13] 王维锐,吴参,陈颖,等. 磁流变减振器滞回特性的改进 Bouc-Wen 模型[J]. 农业机械学报,2011,42(2): 48—53
- WANG W R, WU S, CHEN Y, et al. Modified Bouc-Wen Model Based on Hysteresis Characteristics Experiment of Magneto Rheological Damper [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42 (2): 48—53 (in Chinese)
- [14] 董丹. 磁流变半主动悬架系统及其控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2011
- DONG D. Research on MR Semi-Active Suspension System and Its Control Strategy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011 (in Chinese)

## Simulation for Magnetorheological Damper Semi-active Suspension Based on Fuzzy Control

YAO Xing-yan, HU Li-yue, TIAN Yu

(School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** As a device connecting the car body and the wheel, the car suspension can effectively reduce the vibration caused by uneven road surface. In order to improve the car's comfort and the stability of the operating system, based on the principle of magnetorheological damper and semi-active suspension system, we established the dynamic model of the magnetorheological damper semi-active suspension according to the system design of fuzzy control and by using Matlab/Simulink to build simulation model. Finally, the whole system is simulated under the random road surface, and the analysis shows that the fuzzy control has better vibration reduction effect and can better meet the requirements of suspension performance index.

**Key words:** magnetorheological damper; semi-active suspension system; fuzzy control; Matlab/Simulink

责任编辑:李翠薇

引用本文/Cite this paper:

姚行艳,胡力月,田雨. 基于模糊控制的磁流变减振器半主动悬架系统仿真分析[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020,37(5):1—7

YAO X Y, HU L Y, TIAN Y. Simulation for Magnetorheological Damper Semi-active Suspension Based on Fuzzy Control[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(5): 1—7