

# 某越野汽车磁流变半主动悬架变论域模糊控制\*

庞 辉, 刘 凡, 王 延

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安, 710048)

**摘要** 为了解决半主动悬架传统变论域模糊控制器过度依赖经验规则的问题,提出了一种基于模糊神经网络的变论域 T-S 模糊控制策略。首先,根据磁流变减振器阻尼特性的实验结果,建立基于自适应模糊神经网络的减振器阻尼力模型及 1/2 车辆半主动悬架动力学模型;其次,建立悬架系统 T-S 模糊控制器,同时为了实时调节 T-S 模糊控制器变量的论域,采用模糊神经网络结构描述伸缩因子的变化。仿真结果表明,笔者提出的变论域模糊控制策略能够有效提高车辆行驶平顺性和操作稳定性。

**关键词** 半主动悬架;磁流变减振器;变论域;T-S 模糊控制;模糊神经网络

**中图分类号** TH113.1

## 引 言

车辆悬架系统的主要功能是吸收由路面不平整度引起的振动响应,同时保证轮胎与路面的不间断接触以提高车辆行驶平顺性和操纵稳定性<sup>[1-2]</sup>。由于半主动悬架(semi-active suspension,简称 SAS)兼顾被动悬架(passive suspension,简称 PS)的稳定性和主动悬架的自适应能力,能够根据行驶工况实时调整阻尼力大小,实现与主动悬架相近的减振效果,同时无需过多的能量消耗,因而受到了研究人员广泛关注,磁流变减振器(magneto-rheological,简称 MR)作为非线性元件被广泛应用于半主动悬架系统中<sup>[3]</sup>。但是因为其非线性以及磁滞特性,该减振器力学模型难以精确描述<sup>[4-5]</sup>。Stanway 等<sup>[6]</sup>建立了磁流变减振器的 Bingham 模型,该模型能很好地描述磁流变减振器阻尼力的时域特性及阻尼力与位移的关系特性,但无法表示在速度较小的区域内阻尼力与速度的关系。Spencer 等<sup>[7]</sup>提出了修正的 Bouc-Wen 模型,它能较好地描述磁流变减振器的非线性特性,但模型中有过多的参数需要优化辨识,同时由于模型复杂,在实际应用过程中会导致实时性降低,时滞增大。文献<sup>[8]</sup>针对参数化建模存在的问题建立了一种基于自适应神经模糊的磁流变减振器非参数化模型,同时验证该模型可以高度逼近磁流变减振器实验模型。

针对半主动悬架系统控制器的设计与优化,研究人员开展了大量研究,提出诸如  $H_\infty$  控制<sup>[9-10]</sup>,滑模变结构控制<sup>[11]</sup>,自适应反推控制<sup>[12]</sup>及基于 T-S 模糊模型的控制<sup>[13]</sup>等。其中,T-S 模糊控制由于结构简单且控制策略不依赖于模型,近年来受到广泛关注。例如,文献<sup>[14]</sup>针对主动悬架系统控制执行器的延迟和故障不确定性等问题,在满足安全性能约束要求并保证系统渐近稳定性和鲁棒性前提下,设计了一种模糊鲁棒  $H_\infty$  控制器。文献<sup>[15]</sup>针对非线性半主动悬架系统建立了 T-S 模糊模型,设计了半主动悬架系统的优化模糊控制器。文献<sup>[16]</sup>在考虑车身振动及控制时滞条件下,基于 T-S 模糊模型设计了一种稳定的模糊  $H_\infty$  控制器,实现了悬架系统的渐进稳定以及预期的  $H_\infty$  性能。上述文献所设计的 T-S 模糊控制器,对悬架性能均有一定程度的改善,但传统模糊控制存在过分依赖专家经验的问题,因此导致所设计控制器控制精度难以保证。针对模糊控制存在的不足,文献<sup>[17]</sup>提出了变论域模糊控制的思想,在规则不变的前提下,论域随着误差变小而收缩(亦可随着误差增大而扩展)。论域的这种伸缩变化通过调整伸缩因子的大小来实现,目前对于伸缩因子的描述没有统一形式。如文献<sup>[18-19]</sup>采用函数模型来选择伸缩因子大小,文献<sup>[20-21]</sup>采用模糊模型来描述伸缩因子变化,但是两种描述都存在一定不足,即函数模型难以在控制过程中精确描述伸缩因子变化,而采用模糊模型会导致伸

\* 国家自然科学基金资助项目(51675423;51305342);西安理工大学校科研基金资助项目(2015cx004)  
收稿日期:2017-04-24;修回日期:2017-08-15

缩因子的选择完全依赖于经验公式,产生与模糊控制同样的问题。文献[22]针对1/4车辆半主动悬架提出一种基于模糊神经网络的变论域控制策略,并取得了较好的控制效果,但并未研究分析该控制策略对于车身俯仰及其它运动的控制有效性。

为此,针对依据实验数据所建立的磁流变减振器模型及1/2车辆半主动悬架系统,笔者提出一种改进变论域模糊控制器设计方法。通过建立悬架系统的T-S模糊控制器,设计合适的模糊神经网络结构对T-S模糊控制器的两个输入变量论域进行伸缩调整,结合模糊控制的逻辑语言和神经网络的自学习能力,实现对伸缩因子的精准描述。最后通过仿真分析,验证了笔者所提出控制方法的有效性。

## 1 基于实验数据的MR减振器阻尼特性建模

文中选取路虎极光2016款SUV车所搭载的MagneRide减振器作为研究对象,其内部简化结构如图1左图所示,图1右图为笔者所采用的MagneRide减振器实体。内部结构主要包括磁流变液、活塞、导电线圈、浮动塞以及弹簧。通过调整导电线圈电流大小改变磁流变液中磁性分子排列方式,进而实现减振器阻尼力连续可调。

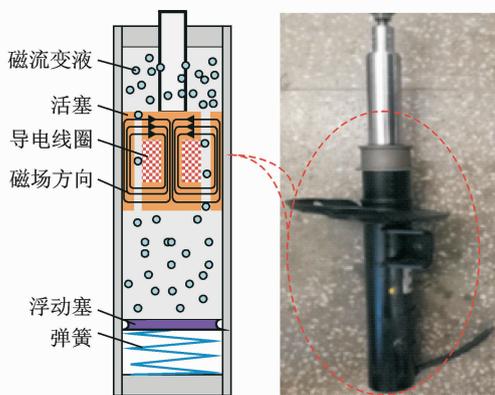


图1 MR减振器实体及内部结构示意图

Fig.1 Photograph and inner schematic configuration of the MR shock absorber

为了精确描述MR减振器的非线性磁滞特性,学者们研究了多种力学模型。其中自适应神经网络模糊非参数化模型在避免大量参数识别的同时,能够较为精确描述MR减振器阻尼特性<sup>[23]</sup>。其结构如图2所示,其中,系统I确定不同电压下阻尼力输出等级 $K$ ;系统II描述特定电压下阻尼力与活塞位移和速度之间的非线性关系, $F=K \times f$ 为减振器输出阻尼力。

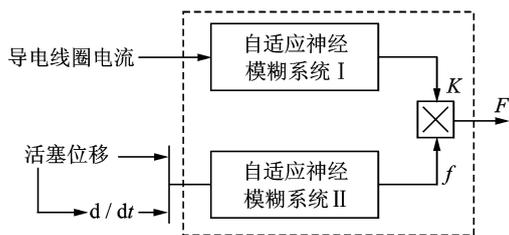
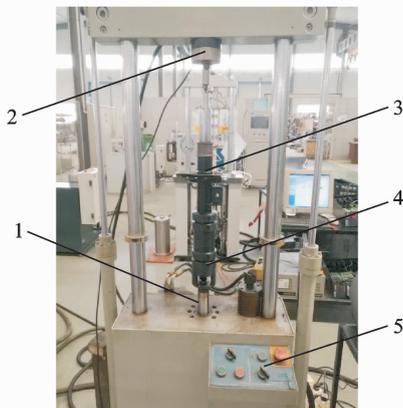


图2 MR减振器自适应神经模糊非参数化模型

Fig.2 Non-parametric model of the MR shock absorber based on adaptive neuro-fuzzy

采用如图3所示的最大输出力为20 kN的电液伺服疲劳试验机对笔者所采用的MagneRide减振器进行实验测试,通过分析实验数据并基于Matlab\Anfis工具箱对实验数据训练建立如图3所示的MR减振器自适应神经模糊模型。图4为频率2 Hz、振幅25 mm时MR减振器输出阻尼力与活塞位移关系曲线以及对应模型仿真结果。



1-位移传感器;2-力传感器;3-磁流变减振器;  
4-减振器固定装置;5-控制面板

图3 MR减振器试验台架

Fig.3 Testing setup of MR damper

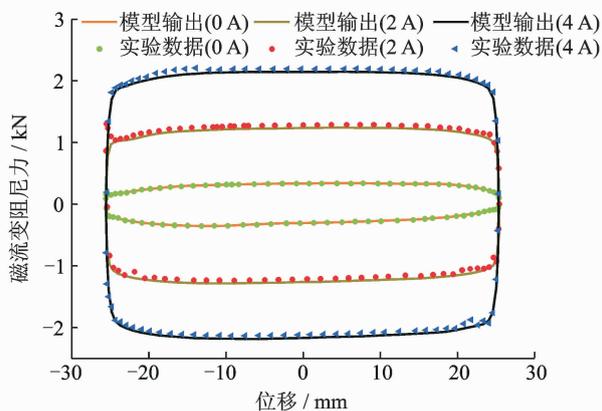


图4 实验数据与模型响应对比

Fig.4 Comparison between the identified model and the measured data

## 2 半主动悬架系统动力学模型

1/2 车辆悬架模型包含了车辆动力学分析的主要特征,且结构简单,所以在悬架控制策略的研究中被广泛应用。图 5 为 4 自由度 1/2 车辆悬架系统模型,其中:  $I_s$  为转动惯量;  $a, b$  为前后轴到质心的距离;  $\theta$  为车身俯仰角;  $m_s$  为折算到半车模型上的簧载质量;  $m_{uf}, m_{ur}$  为非簧载质量;  $k_{tf}, k_{tr}$  为轮胎刚度系数;  $z_s, z_{uf}, z_{ur}, q_f, q_r$  分别为簧载质量、非簧载质量和路面的绝对位移;  $k_f, k_r$  为悬架的刚度。模型中用线性弹簧代替弹性轮胎,忽略轮胎阻尼;减振器固有阻尼及可变阻尼力代替磁流变减振器,因此前后磁流变减振器阻尼力可表示为

$$\begin{cases} F_{MRf} = c_f \Delta \dot{y}_f + u_f \\ F_{MRr} = c_r \Delta \dot{y}_r + u_r \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\Delta \dot{y}_f, \Delta \dot{y}_r$  为前后轮悬架速度;  $u_f, u_r$  为磁流变减振器可变阻尼力;  $c_f, c_r$  为减振器固有阻尼。

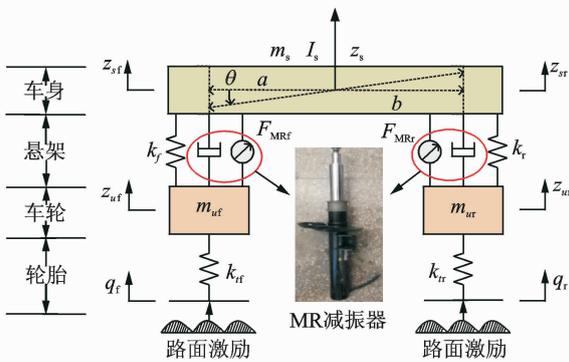


图 5 1/2 车辆悬架系统模型

Fig. 5 The half vehicle dynamic model

如图 5 所示的 1/2 车辆振动模型中,要求车辆相对于纵垂面完全对称,而且左右车轮下的路面不平度完全一样,即认为车辆是在纵垂面上的振动,对其受力分析如下。

对于前后轴上方的垂直位移有如下关系

$$\begin{cases} z_{sf} = z_s - a \tan \theta \approx z_s - a \theta \\ z_{sr} = z_s + b \tan \theta \approx z_s + b \theta \end{cases} \quad (2)$$

则悬架系统动力学方程为

$$\begin{cases} m_{uf} \ddot{z}_{uf} = -k_{tf}(z_{uf} - q_f) + k_f(z_s - a\theta - z_{uf}) + F_{MRf} \\ m_{ur} \ddot{z}_{ur} = -k_{tr}(z_{ur} - q_r) + k_r(z_s - a\theta - z_{ur}) + F_{MRr} \\ m_s \ddot{z}_s = -k_f(z_s - a\theta - z_{uf}) - k_r(z_s - a\theta - z_{ur}) - F_{MRf} - F_{MRr} \\ I_y \ddot{\theta} = a[k_f(z_s - a\theta - z_{uf}) + F_{MRf}] - b[k_r(z_s - a\theta - z_{ur}) + F_{MRr}] \end{cases} \quad (3)$$

## 3 变论域模糊控制系统设计

### 3.1 变论域模糊控制基本思想

变论域模糊控制的思想可以描述为:假定  $X_i = [-E_i, E_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 代表输入变量  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 的模糊论域,  $Y = [-U, U]$  代表输出变量  $y$  的模糊论域。同时  $\{A_{il}\}$  分别表示模糊语言变量  $X_i, Y$  的模糊集合<sup>[24]</sup>。具体描述如下。

1) 在规则不变的前提下,论域随初始论域  $[-E, E]$  通过伸缩因子  $\alpha(x)$  变换为  $[-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ , 如图 6 所示,  $\alpha(x)$  为误差变量  $x$  的连续函数。

2) 变论域的思想意味着变量  $X_i, Y$  的模糊论域随着输入输出变量  $x_i, y$  而变化,具体表达形式如式 (4), (5) 所示。

$$X_i(x_i) = [-\alpha_i(x_i)E_i, \alpha_i(x_i)E_i] \quad (4)$$

$$Y(y) = [-\beta(y)U, \beta(y)U] \quad (5)$$

其中:变量  $\alpha_i(x_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\beta(y)$  分别表示  $X_i, Y$  的伸缩因子。

另外,  $X_i, Y$  的初始论域定义为原始论域,且采用 7 个语言模糊子集 {NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZE(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}。输入输出模糊论域伸缩变化如图 6 所示。

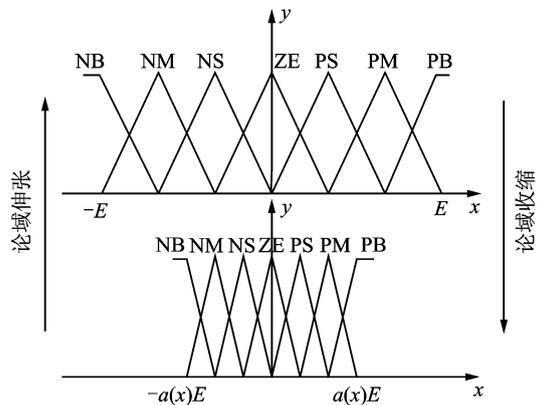


图 6 变论域模糊控制基本思想

Fig. 6 The variation of contracting-expanding universe

文献[25]采用模糊推理来描述伸缩因子的变化,其仿真结果表明,基于模糊推理的变论域模糊控制(variable-universe fuzzy control based on fuzzy reasoning, 简称 VUFC-FR)算法能够有效地提高收敛速度和控制精度,但是这种控制算法伸缩因子的模糊论域划分不够精确,从而导致控制结果存在误

差。针对这一不足,笔者采用模糊神经网络结构来控制伸缩因子的变化,结合模糊推理的语言逻辑性和神经网络的自学习调整优势,通过系统误差分析以及神经网络的自学习调整修正伸缩因子的模糊论域划分。基于模糊神经网络的变论域模糊控制(variable-universe fuzzy control based on fuzzy neural network,简称 VUFC-FNN)框图如图7所示, $r$ 和 $y$ 分别代表理想的输入和控制信号, $I$ 表示控制电流, $F_{MR}$ 为减振器输出阻尼力, $e$ 为系统控制误差,并表示为 $e=r-y$ 。

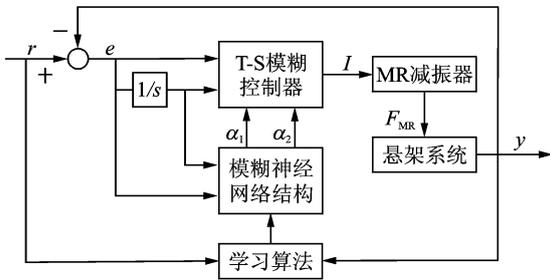


图7 基于模神经网络的变论域模糊控制框图

Fig. 7 The control block of VUFC based on FNN

### 3.2 基于 T-S 模糊模型的变论域控制器设计

T-S 型模糊控制器可由如下方程组成:

$R_i$ : 如果  $x_1$  为  $A_{i1}$ ,  $x_2$  为  $A_{i2}$ ,  $\dots$ ,  $x_j$  为  $A_{ij}$ ,  $\dots$ ,  $x_n$  为  $A_{in}$ , 那么

$$g_i(\mathbf{X}) = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ij}x_j + \dots + a_{in}x_n \quad (6)$$

$$f(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{i=1}^R g_i(\mathbf{X})\mu_i(\mathbf{X})}{\sum_{i=1}^R \mu_i(\mathbf{X})} \quad (7)$$

$$\mu_i(\mathbf{X}) = \prod_{j=1}^n A_{ij}(x_j) \quad (8)$$

$$A_{ij}(x_j) = h_{ij}(x_j) \quad (9)$$

其中: $R_i$  ( $i=1, 2, \dots, R$ ) 为第  $i$  条规则; $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n]^T$  为模糊控制器的输入矢量; $x_j$  ( $j=1, 2, \dots, R$ ) 为第  $j$  个输入变量; $A_{ij}$  为模糊集合; $g_i(\mathbf{X})$  为第  $i$  条规则的输出; $f(\mathbf{X})$  为模糊控制器的输出,采用中心平均解模糊方法; $\mu_i(\mathbf{X})$  为第  $i$  条规则的定义为乘积形式的满足程度; $A_{ij}(x_j)$  为  $x_j$  对  $A_{ij}$  的满足程度; $h_{ij}(x_j)$  为定义在输入论域上的隶属度函数<sup>[26]</sup>。

文中选取车身加速度  $\ddot{z}_s$ 、簧载质量与非簧载质量的相对速度  $v_r$  作为控制器的输入,控制器的输出为半主动悬架磁流变减振器的控制电流  $I$ 。对输入变量,论域为  $\{-1, 1\}$ ,采用 7 个语言模糊子集  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ,采用高斯型隶属

度函数。

T-S 模糊控制器在设计过程中有两个关键性问题:a. 确定控制规则数目;b. 确定规则后件的系数。确定规则数目的过程,即对输入变量划分的过程,它需要产生合理的子空间。确定控制规则后件系数也就是确定区域作用量的过程。解决这两个关键问题步骤如下。

1) 最优参数。行驶平顺性和操纵稳定性是汽车动力学研究的两个重要领域,悬架系统在协调这两大使用性能方面起着非常重要的作用。在分析悬架诸多影响因子中,选取 3 个基本参数对悬架性能作评价,分别为车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷。为了同时满足车辆行驶平顺性和操纵稳定性的要求,建立如式(10)所示的目标函数  $J$

$$J = (\ddot{z}_s)_{RMS} + (z_{sf} - z_{uf})_{RMS} + (z_{uf} - q_f)_{RMS} + (z_{sr} - z_{ur})_{RMS} + (z_{ur} - q_r)_{RMS} \quad (10)$$

其中: $RMS$  为均方根值 (root-mean-square, 简称

$RMS$ ),具体计算式表达式为  $x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

2) 仿真过程中,以目标函数  $J$  作为评价函数,仿真时间 3 s,步长 0.01,获取一组以车身加速度  $\ddot{z}_s$  和悬架相对速度  $v_r$  为输入,理想控制电流  $I$  为输出数据。将数据导入 Matlab 工具箱中,用自适应神经网络推理系统对数据进行训练,得到所需的基于 T-S 模糊模型的磁流变半主动悬架控制系统。

### 3.3 模糊神经网络伸缩因子设计

决定论域伸缩因子大小的模糊神经网络采用二输入二输出的 5 层前向神经网络结构,网络的输入节点为车身加速度  $\ddot{z}_s$  以及簧载与非簧载质量的相对速度  $v_r$ ,输出节点为系统模糊控制器输入变量的伸缩因子  $\alpha_1, \alpha_2$ 。模糊子空间均分为 7 个子集,即  $\{PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB\}$ 。伸缩因子模糊神经网络 FNN 的结构如图 8 所示。

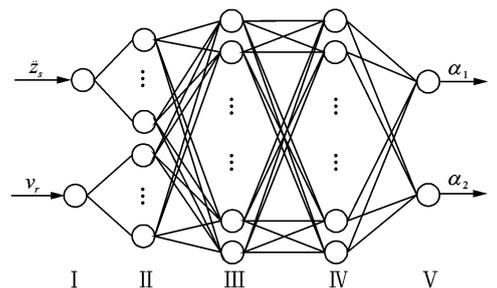


图8 模糊神经网络(FNN)的结构

Fig. 8 The structure of FNN

网络的 I, II 层对应于模糊规则“if”前提,采用高斯型函数作为隶属函数。

$$f_i^{(1)} = x_i \quad (11)$$

$$x_{ij} = -(f_i^{(1)} - c_{ij})^2 / b_{ij}^2 \quad (12)$$

$$f_{ij}^{(2)} = \exp(-(x_{ij} - c_{ij})^2 / b_{ij}^2) \quad (13)$$

其中:  $f_i^{(1)}$  代表 I 层第  $i$  个节点的输出变量;  $f_{ij}^{(2)}$  表示 II 层第  $i$  个输入变量对第  $j$  个模糊子集的激活度;  $i = 1, 2; x_1 = \tilde{z}_s, x_2 = v_r; j = 1, 2, \dots, m_i; c_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为第  $i$  个输入变量第  $j$  个模糊集合的隶属度函数的中心值和宽度。

网络的 III, IV 层采用 Mamdani 推理法实现模糊推理。在该推理运算中,  $f_j^{(3)}$  为节点  $j$  所有输入信号的最小值, 归一化运算结果用  $f_j^{(4)}$  表示。具体计算式如式(14), (15)所示

$$f_j^{(3)} = \min\{x_{1i_1^{(2)}}, x_{2i_2^{(2)}}\} \quad (14)$$

$$f_j^{(4)} = f_j^{(3)} / \sum_{i=1}^m f_i^{(3)} \quad (15)$$

其中:  $j = 1, 2, \dots, m; m = m_i^2$ 。

网络的 V 对应解模糊层, 采用面积重心法实现解模糊化。该层的输出节点  $f^{(5)}$  为调节系统模糊论域的伸缩因子  $\alpha_1, \alpha_2$ , 即

$$f_i^{(5)} = \omega f_j^{(4)} = \sum_{j=1}^m \omega_{ij} f_j^{(4)} \quad (16)$$

其中:  $\omega_{ij}$  为  $f_i^{(5)}$  的第  $j$  个语言变量值隶属函数的中心值;  $i = 1, 2; f_1^{(5)} = \alpha_1; f_2^{(5)} = \alpha_2$ 。

在实现伸缩因子调整的模糊神经网络 FNN 结构中, 输入分量的模糊划分个数  $m_i$  是预先确定的, 则需要学习的参数包括最后一层的连接权  $\omega_{ij}$  (该层对应于伸缩因子模糊控制器的输出论域的中心值,  $i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, m$ ) 和 II 层隶属度函数的中心值  $c_{ij}$  和宽度  $b_{ij}$  ( $i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, m_i$ )<sup>[27]</sup>。

上述伸缩因子模糊神经网络是一种多层前馈网络, 因此可以采用误差反转的方法设计调整参数的学习算法, 从而使系统的实际输出逼近期望输出。设  $y_r$  和  $y$  分别表示期望输出和实际输出, 定义误差能量函数  $E = 1/2(y_r - y)^2$ , 则模糊神经网络的调整参数的自学习算法如式(17)所示

$$\begin{cases} \omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \\ C_{ij}(k+1) = C_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} \\ B_{ij}(k+1) = B_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial b_{ij}} \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $\eta > 0$  为模糊神经网络学习速率。

为了验证笔者提出的基于模糊神经网络的变论域模糊控制算法的有效性和稳定性, 使用

Matlab/Simulink 工具箱建立该控制算法的仿真模型, 在随机不平路面激励下, 选择车身加速度、俯仰角加速度、悬架动行程及轮胎动载荷作为输出测量变量。

## 4 仿真分析

### 4.1 随机不平路面模型

文中采用白噪声法建立路面模型为

$$\dot{q}(t) = -2\pi f_0 q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{Gq(n_0)} u\omega(t) \quad (18)$$

其中:  $f_0$  为路面输入的下截止频率;  $n_0$  为参考空间的频率;  $Gq(n_0)$  为路面不平度系数;  $u$  为车速;  $\omega(t)$  为白噪声。

Matlab/Simulink 仿真所得随机不平路面<sup>[28]</sup>如图 9 所示。

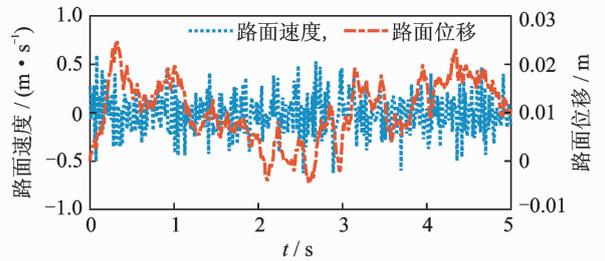


图 9 B 级路面激励信号

Fig. 9 The B-class road excitation used for simulation

### 4.2 仿真实验

文中仿真采用的车辆磁流变半主动悬架参数见表 1。

表 1 1/2 车辆磁流变半主动悬架系统模型参数

Tab. 1 Parameters for half vehicle SAS with MR damper

参 数	数 值
$m_s/\text{kg}$	1 235
$I_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 731
$m_{uf}(m_{ur})/\text{kg}$	49
$k_t(k_r)/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	22 741
$c_t/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1 221
$c_r/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1 228
$a/\text{m}$	1.2
$b/\text{m}$	1.5
$k_{rt}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	492 982
$k_{rt}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	302 342

在控制仿真中, 采用随机路面激励作为输入信号, 基于 Matlab/Simulink 工具箱的改进变论域模糊控制器设计如图 10 所示。

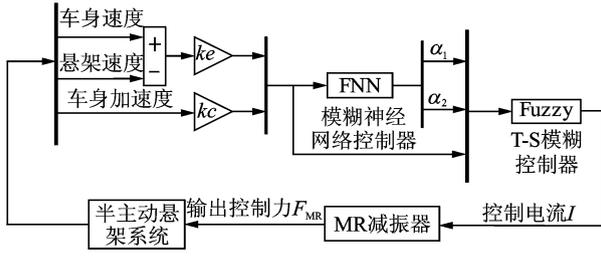


图 10 变论域模糊控制系统模型

Fig. 10 Simulation block diagrams of the enhanced VUFC

图中:  $ke$ ,  $kc$  为 T-S 模糊控制器比例因子;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  为输入变量伸缩因子。ANFIS 采用模糊神经网络控制车身垂向加速度、车身相对速度的论域变化范围。T-S 模糊控制器输出为控制电流  $I$ , 同时  $I$  作为 MR 减振器模型输入, 得到控制阻尼力并作用于半主动悬架系统。

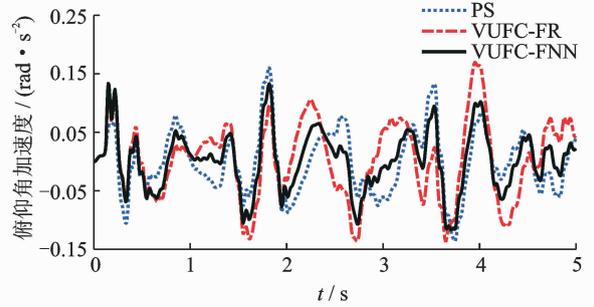
仿真条件为 B 级随机路面, 车速为 20 m/s。

图 11~15 分别为随机路面激励下, 车身加速度  $\ddot{z}_s$ 、俯仰角加速度  $\ddot{\theta}$  响应曲线及其功率谱密度分析、悬架动行程  $\Delta y$ 、轮胎动载荷  $F_t$  以及 MR 减振器输出阻尼力  $F_{MR}$ 。

从图 11、图 12 可以看出, 相比于被动和 VU-FU-FR 控制悬架, VUFC-FNN 控制的 MR 半主动悬架车身加速度和俯仰角加速度优化效果明显; 同

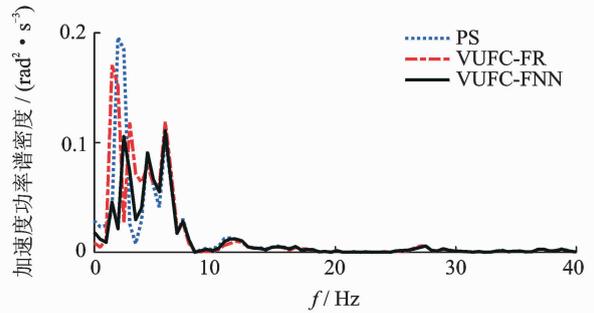
时在频域响应, 车身加速度和俯仰角加速度功率谱密度也得到了较好改善。

从图 13 可以看出, VUFC-FNN 控制算法可有



(a) 俯仰角加速度

(a) Pitch angle acceleration

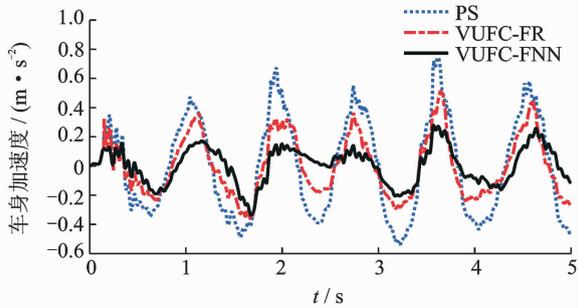


(b) 加速度功率谱密度

(b) Acceleration power spectral density

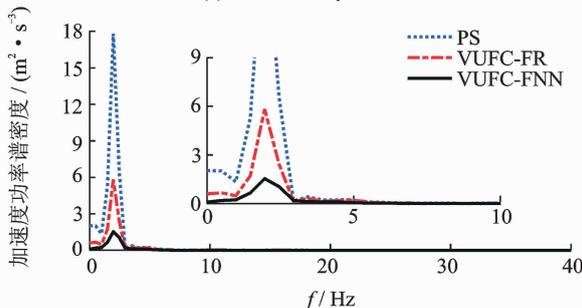
图 12 车身俯仰角加速度响应

Fig. 12 Responses to vehicle body pitch angular acceleration



(a) 车身加速度

(a) Vehicle body acceleration

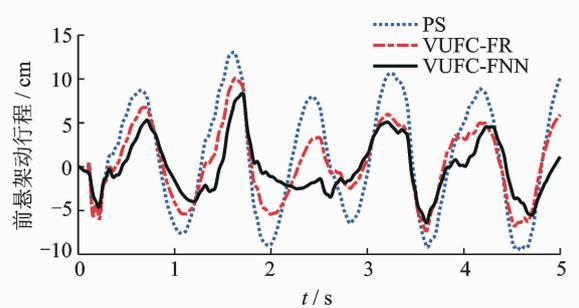


(b) 加速度功率谱密度

(b) Acceleration power spectral density

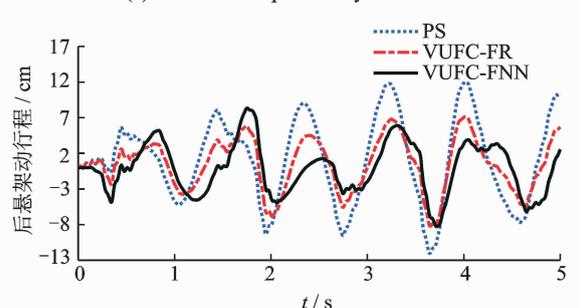
图 11 车身加速度响应

Fig. 11 Response to vehicle body acceleration



(a) 前悬架动行程

(a) The front suspension dynamic deflection



(b) 后悬架动行程

(b) The rear suspension dynamic deflection

图 13 悬架动行程响应

Fig. 13 Responses to the suspension dynamic deflection

效减小前后轮悬架动行程,防止悬架动行程超出限定范围而导致悬架击穿。从图 14 可以看出,VU-FU-FNN 控制 MR 半主动悬架可有效改善路面作用于轮胎的冲击载荷,提高轮胎寿命同时保证车辆操作稳定性。图 15 为前后轮 MR 减振器所产生的阻尼力。

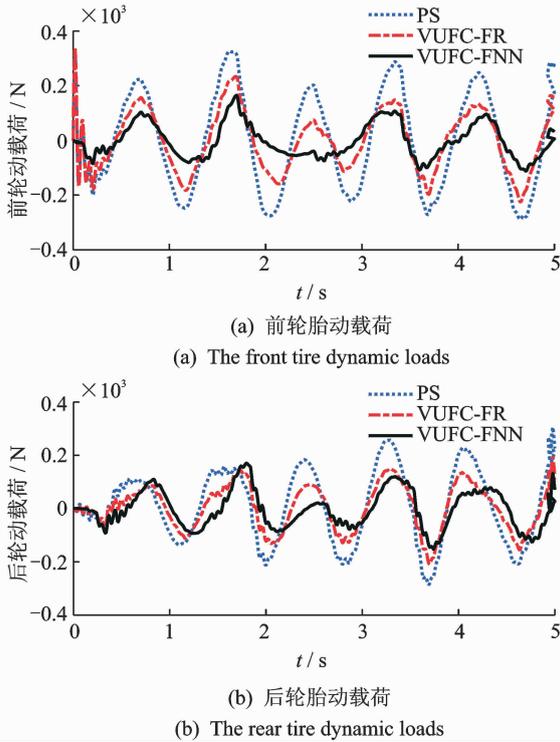


图 14 轮胎动载荷响应

Fig. 14 Response to the tire dynamic loads

为进一步说明控制算法的有效性,表 2 列出了被动悬架、VUFC-FR 及 VUFC-FNN 控制悬架在随机不平路面扰动下车身加速度、俯仰角加速度、悬架动行程、轮胎动载荷的均方根值以及优化的百分比。

表 2 悬架性能指标均方根值比较

Tab. 2 Comparison of RMS values of suspension performance

性能	PS	VUFC-FR	VUFC-FNN
$\ddot{z}_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.356 1	0.214 6(39.74%)	0.121 7(62.82%)
$\ddot{\theta} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3})$	0.071 2	0.060 5(15.02%)	0.057 3(19.52%)
$\Delta y_t / \text{m}$	0.006 7	0.004 3(35.82%)	0.003 1(53.73%)
$\Delta y_r / \text{m}$	0.006 2	0.003 8(35.82%)	0.003 4(41.79%)
$F_{tt} / \text{N}$	241.780 8	159.259 7(34.13%)	87.404 0(62.85%)
$F_{tr} / \text{N}$	203.769 8	142.435 6(30.10%)	119.951 4(41.13%)

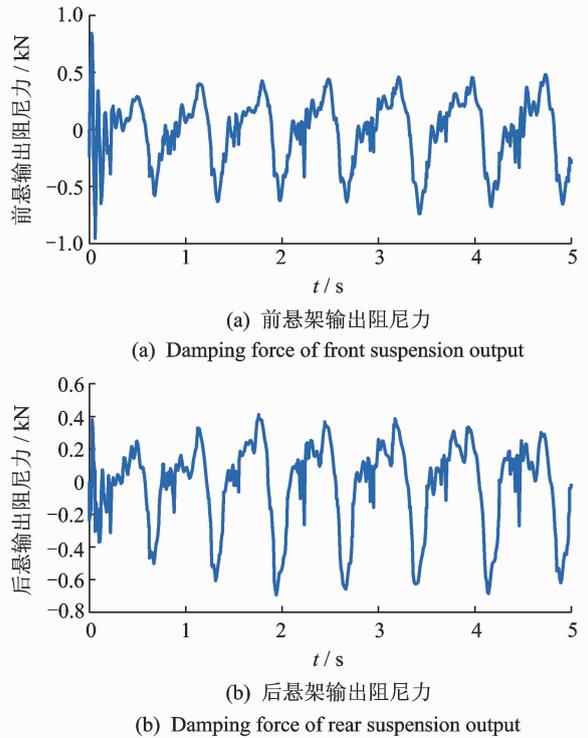


图 15 磁流变减振器输出阻尼力

Fig. 15 Response to the MR damper force

从表 2 可以看出,VUFC-FNN 控制 MR 半主动悬架在随机不平路面扰动下,各项性能指标均有一定程度的提升,而且优化效果明显优于 VUFC-FR 控制悬架,说明笔者所提出的 VUFC-FNN 控制算法能够有效提高车辆行驶平顺性和操作稳定性。

## 5 结束语

通过建立 1/2 车辆 MR 半主动悬架系统动力学模型,考虑随机路况条件的影响,研究了基于模糊神经网络的变论域模糊控制方法,并与被动悬架和基于模糊推理的变论域模糊控制进行比较。研究表明,相比于被动悬架,笔者提出的 VUFC-FNN 控制 MR 半主动悬架系统各项性能指标均有一定提升。车身加速度和俯仰角加速度分别优化 62.82%和 19.52%;前后轮悬架动行程和轮胎动载荷分别改善 53.73%,41.79%,62.85%和 41.13%。基于模糊神经网络的变论域模糊控制能适应路面工况的变化,可有效改善车辆行驶的操作稳定性和乘坐舒适性,且控制效果优于基于模糊推理的变论域模糊控制。

## 参 考 文 献

- [1] 严天一,任坤儒,王玉林,等. 车辆半主动悬架系统模糊混合控制策略[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 11-15.  
Yan Tianyi, Ren Kunru, Wang Yulin, et al. Fuzzy hybrid control strategy of semi-active suspensions for vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 11-15. (in Chinese)
- [2] 刘伟,刘大维,陈焕明,等. 基于联合仿真的半主动悬架车辆行驶平顺性研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 16-22.  
Liu Wei, Liu Dawei, Chen Huanming, et al. Ride comfort of MR-damper semi-active suspension system based on co-simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 16-22. (in Chinese)
- [3] Majdoub K, Ghani D, Giri F, et al. Adaptive semi-active suspension of quarter-vehicle with magnetorheological damper[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2014, 137(2): 021010.
- [4] Zapateiro M, Pozo F, Karimi H, et al. Semiactive Control methodologies for suspension control with magnetorheological dampers[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(2): 370-380.
- [5] Nguyen Q, Choi S. Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension[J]. Smart Materials & Structures, 2009, 18(3): 035012.
- [6] Stanway R, Sproston J, Stevens N. Non-linear modeling of an electro-rheological vibration dampers[J]. Journal of Electrostatics, 1987, 20(2): 167-184.
- [7] Spencer J, Dyke S, Sain M, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(3): 230-238.
- [8] 郑玲,周忠永. 基于自适应神经模糊的磁流变阻尼器非参数化建模[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 25-29.  
Zheng Ling, Zhou Zhongyong. Non-parametric modeling for a magneto-rheological(MR) damper based on an adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 25-29. (in Chinese)
- [9] 张孝祖,黄少华. 鲁棒  $\mu$  控制的半主动悬架[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 19-22.  
Zhang Xiaozu, Huang Shaohua. Semi-active suspensions with robust  $\mu$  control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 19-22. (in Chinese)
- [10] Du H, Sze K, Lam J. Semi-active  $H_\infty$  control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers [J]. Journal of Sound & Vibration, 2005, 283(283): 981-996.
- [11] 姚嘉凌,郑加强,蔡伟义. 车辆半主动悬架模型参考滑模控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 5-8.  
Yao Jialing, Zheng Jiaqiang, Cai Weiyi. Sliding mode model-following control of automobile semi-active suspension system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 5-8. (in Chinese)
- [12] 庞辉,陈嘉楠,梁军,等. 基于模型参考方法的车辆非线性主动悬架反推控制[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1761-1769.  
Pang Hui, Chen Jianan, Liang Jun, et al. Backstepping controller design for nonlinear active vehicle suspension based on model reference control[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(10): 1761-1769. (in Chinese)
- [13] Tang Xin, Du Haiping, Sun Shuaishuai, et al. Takagi-sugeno fuzzy control for semi-active vehicle suspension with a magnetorheological damper and experimental validation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 291-300.
- [14] Li Hongyi, Liu Honghai, Gao Huijun, et al. Reliable fuzzy control for active suspension systems with actuator delay and fault[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(2): 342-357.
- [15] Abushaban M, Abushadrus I, Sabra M. A new fuzzy control strategy for active suspensions applied to a half car model[J]. Journal of Mechatronics, 2013, 1(2): 1-7.
- [16] Ou Ou, Mao Yanbing, Zhang Hongbin, et al. Robust  $H_\infty$  control of a class of switching nonlinear systems with time-varying delay via T-S fuzzy model[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2014, 33(5): 1411-1437.
- [17] Li Hongxing. Adaptive fuzzy controllers based on variable universe [J]. Science China Technological Sciences, 1999, 42(1): 10-20.
- [18] Shan Weiwei, Ma Yuan, Newcomb R, et al. Analog circuit implementation of a variable universe adaptive fuzzy logic controller[J]. IEEE Transactions on Cir-

- cuits & Systems II Express Briefs, 2008, 55(10): 976-980.
- [19] Wang Jiang, Si Wenjie, Li Huiyan. Robust ISS-satisficing variable universe indirect fuzzy control for chaotic systems[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2009, 39(1): 28-38.
- [20] 陈杰平, 冯武堂, 郭万山, 等. 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 Jiepin, Feng Wutang, Guo Wanshan, et al. Whole vehicle magnetorheological fluid damper semi-active suspension variable universe fuzzy control simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 7-13. (in Chinese)
- [21] Long Zuqiang, Yuan Yan, Long Wen. Designing fuzzy controllers with variable universes of discourse using input-output data[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 36(C): 215-221.
- [22] Pang Hui, Liu Fan, Liu Xue. Enhanced variable-universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension systems[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 31(6): 2999-3006.
- [23] Kyang K, Truong D, Islam M. Modeling of a magnetorheological (MR) fluid damper using a self-tuning fuzzy mechanism[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(5): 1485-1499.
- [24] Li Hongxing, Miao Zhihong, Wang Jiayin. Variable universe stable adaptive fuzzy control of nonlinear system[J]. Science in China, 2002, 45(3): 225-240.
- [25] 刘非, 李以农, 郑玲. 装甲车辆磁流变半主动悬架变论域模糊控制[J]. 汽车工程, 2013, 35(8): 735-739.  
Liu Fei, Li Yinong, Zheng Ling. Variable universe fuzzy control for the magnetorheological semi-active suspension in armored vehicles[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(8): 735-739. (in Chinese)
- [26] 肖会芹, 何勇, 吴敏, 等. 基于 T-S 模糊模型非线性网络控制系统改进  $H_\infty$  跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(1): 71-78.  
Xiao Huiqin, He Yong, Wu Min, et al. Improved  $H_\infty$  tracking control for nonlinear networked control systems based on T-S fuzzy model[J]. Control Theory & Application, 2012, 29(1): 71-78. (in Chinese)
- [27] Liang Xiao, Li Ye, Xu Yuru, et al. Fuzzy neural network control of underwater vehicles based on desired state programming [J]. Journal of Marine Science and Application, 2006, 5(3): 1-4.
- [28] Pang Hui, Fu Wenqiang, Liu Kai. Stability analysis and fuzzy smith compensation control for semi-active suspension systems with time delay[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 29(6): 2513-2525.



**第一作者简介:** 庞辉, 男, 1980 年 4 月生, 博士后、副教授。主要研究方向为车辆动力学分析与控制。曾发表《基于模型参考方法的车辆非线性主动悬架反推控制》(《兵工学报》2016 年第 37 卷第 10 期) 等论文。

E-mail: huipang@163.com

