DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2024.04.015

车辆主动悬架自适应变论域T-S模糊控制研究*

李韶华[1,3]， 季广港[1,2,4]， 冯桂珍[1,3]， 王 贺[1,3]
（1.石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄,050043）
（2.石家庄铁道大学交通运输学院 石家庄,050043）
（3.河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室 石家庄,050043）
（4.山东交通学院轨道交通学院 济南,250000）

摘要 针对传统变论域模糊控制存在过度依赖专家经验、伸缩因子参数不能自适应调整的问题，提出一种车辆主动悬架自适应变论域T-S模糊控制策略，从而提高车辆的行驶平顺性。结合神经网络和T-S模糊推理建立基于自适应神经模糊推理的一阶T-S模糊控制器，利用神经网络的自学习特性产生完善的模糊规则，进而在传统函数型伸缩因子的基础上，将系统误差和误差变化率作为动态参数引入伸缩因子中，实现伸缩因子参数的自适应调整，解决了传统函数型伸缩因子因参数确定难度大导致控制效果差的问题。通过随机工况下的仿真分析和基于相似理论的缩尺实验，对所提出算法的有效性和工况自适应性进行了验证。结果表明，所提出的自适应变论域T-S模糊控制策略具有较强的工况适应性，在不同车速、路面激励下均可有效提高车辆的平顺性并保证轮胎接地安全性。

关键词 主动悬架；变论域；伸缩因子；T-S模糊控制；神经模糊系统
中图分类号 TH113.1

引 言

主动悬架系统采用可调执行器代替传统弹簧阻尼结构，能够有效提高车辆的行驶平顺性[1]。为改善主动悬架性能，学者们提出了预瞄控制、鲁棒控制、神经网络控制以及模糊控制等控制算法。神经网络具有较强的自学习能力，能够实现复杂系统的非线性逼近，但其训练时间长，收敛速度慢，没有明确的物理参数作为算法调节标准，需要与其他算法结合形成复合控制策略，才能获得较好的控制效果。Aela等[2]将神经网络与反步控制相结合，设计了主动悬架控制器，能够较好地处理系统非线性和模型不确定性等问题。Liu等[3]针对车辆主动悬架的能耗问题设计反向传播神经网络-比例积分微分(back propagation neural network and proportional integral derivative，简称BP-PID)控制器，并仿真验证了算法的有效性。李以农等[4]采用自适应神经模糊系统(adaptive neuro-fuzzy inference system，简称ANFIS)识别路面等级来确定控制器目标系数，实现主动悬架系统安全性和舒适性之间的协调控制。

模糊控制作为一种智能控制方法[5]，对参数多变、信号输入繁杂的悬架系统具有较好的适应性。刘非等[6]利用两级Mamdani模糊构建变论域模糊控制器，依靠专家经验确定伸缩因子和控制器的模糊规则，一定程度上提高了模糊控制的控制精度。Mamdani控制器模糊规则的确定过度依赖专家经验，导致控制精度难以保证。T-S模糊控制可直接输出清晰值，不需要经过反模糊化处理，具有响应速度快、控制精度高和非线性逼近能力强等优点。庞辉等[7]基于模糊神经网络设计了车辆半主动悬架变论域模糊控制器，结合模糊推理和BP算法自学习优势来控制伸缩因子的变化，通过仿真取得了一定的控制效果。此算法需要提前训练网络模型，不同车辆系统结构不同，相应的网络模型不同，无法根据具体车辆和工况实时调整伸缩因子，且缺少实验论证。王大勇等[8]针对半主动悬架提出变论域模糊PID控制方法，引入传统函数型伸缩因子对控制器的论域进行改变。函数型伸缩因子具有系统响应速度快的优点，但针对不同的控制对象，参数取值不一样，设计难度大，不能实现控制系统的论域自适应性。模糊型伸缩因子过度依赖专家经验，模糊规则的完善性难以保证，尤其对于高阶非线性控制系统的设计难度较大。因此，如何设计满足控制系统自

* 国家自然科学基金重点资助项目(U22A20246)
收稿日期:2022-07-16;修回日期:2022-08-07

适应性的伸缩因子是一个重要的研究课题。

笔者针对某国产SUV车辆主动悬架系统，提出一种基于自适应伸缩因子的变论域T-S模糊控制方法（variable-universe T-S fuzzy control based on adaptive expansion factor，简称VUFC-AEF）。根据系统误差和误差变化率设计一种参数自适应型伸缩因子，实现控制系统的论域自适应性，避免了完全依靠专家经验确定伸缩因子参数的问题，并利用仿真分析和缩尺模型实验验证了该方法的有效性。

1 车辆主动悬架系统动力学模型

为便于控制策略设计并进行台架实验验证[9]，建立1/4车辆主动悬架模型，如图1所示。

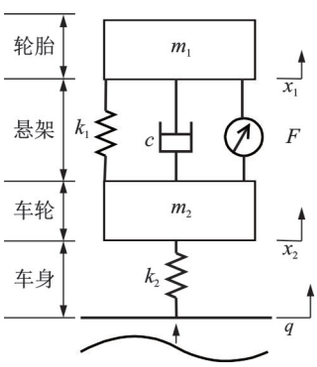


图1 1/4车辆主动悬架模型

Fig.1 Model of active suspension for 1/4 vehicle

对悬架系统进行动力学分析，得到系统动力学方程为

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1+c(\dot{x}_1-\dot{x}_2)+k_1(x_1-x_2)-F=0 \\ m_2\ddot{x}_2-c(\dot{x}_1-\dot{x}_2)-k_1(x_1-x_2)+k_2(x_2-q)+F=0 \end{cases} \tag{1}$$

其中：m_1为车辆簧载质量；m_2为车辆非簧载质量；k_1为悬架的刚度；k_2为轮胎的刚度；c为悬架的阻尼，这里忽略轮胎阻尼；q,x_1,x_2分别为路面激励、簧载质量和非簧载质量的垂向位移。

选取轮胎动变形x_2-q，悬架动挠度x_1-x_2，车轮速度$\dot{x}_2$和车身速度$\dot{x}_1$构成悬架系统的状态向量，即$\boldsymbol{X}=[x_2-q,x_1-x_2,\dot{x}_2,\dot{x}_1]^{\mathrm{T}}$，路面速度激励$\dot{q}$和主动控制力$F$构成系统输入。车身加速度$\ddot{x}_1$，悬架动挠度$x_1-x_2$，轮胎动变形$x_2-q$和轮胎动载荷$k_2(x_2-q)$构成系统的输出变量，即$\boldsymbol{Y}=[\ddot{x}_1,x_1-x_2,x_2-q,k_2(x_2-q)]^{\mathrm{T}}$。由式(1)得到系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}+\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{Y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{U} \end{cases} \tag{2}$$

其中：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ \dfrac{-k_2}{m_2} & \dfrac{k_1}{m_2} & \dfrac{-c}{m_2} & \dfrac{c}{m_2} \\ 0 & \dfrac{-k_1}{m_1} & \dfrac{c}{m_1} & \dfrac{-c}{m_1} \end{bmatrix};\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{-1}{m_2} \\ \dfrac{1}{m_1} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} 0 & \dfrac{-k_1}{m_1} & \dfrac{c}{m_1} & \dfrac{c}{m_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$\boldsymbol{\Gamma}=[-1\quad 0\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{U}=[F]$；$\boldsymbol{W}=[\dot{q}]$。

2 自适应伸缩因子变论域T-S模糊控制策略

2.1 基于ANFIS的变论域T-S模糊控制器

变论域模糊是利用伸缩因子在线调整，使模糊论域随系统输入的变化而变化，从而提高控制精确性。假定系统的理想输入为$r(t)$，实际输出为$y(t)$，误差为$e(t)$，误差变化率为$e_{\mathrm{c}}(t)$。$\boldsymbol{X}_i=[-E_i,E_i]$ $(i=1,2,\cdots,n)$和$\boldsymbol{Y}=[-\boldsymbol{U},\boldsymbol{U}]$分别为输入和输出变量的模糊论域，则调节后得到的新论域为

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}_i(x_i)=[-\alpha_i(x_i)E_i,\alpha_i(x_i)E_i] \\ \boldsymbol{Y}(y)=[-\beta(y)\boldsymbol{U},\beta(y)\boldsymbol{U}] \end{cases} \tag{3}$$

其中：$\alpha(e(t))$，$\alpha(e_{\mathrm{c}}(t))$和$\beta(e(t),e_{\mathrm{c}}(t))$分别为输入变量和输出变量的伸缩因子。

ANFIS是综合神经网络和T-S模糊推理系统的一种自适应网络系统，能以任意精度逼近T-S模糊推理系统来表达非线性函数。图2为ANFIS系统结构图。图中：L_1层负责输入变量x_1,x_2的模糊化处理过程；L_2层负责计算模糊规则适用度值；L_3层负责模糊规则适用度值地归一化处理；L_4层负责计算

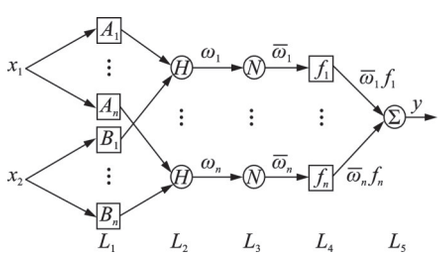


图2 ANFIS系统结构图

Fig.2 The structure diagram of ANFIS

输出；L_5层负责计算系统总输出 y。

如果 x_1 为 A_{i1}，x_2 为 A_{i2}，x_j 为 A_{ij}，…，x_n 为 A_{in}，则

$$y_i(\boldsymbol{X})=b_{i0}+b_{i1}x_1+b_{i2}x_2+\cdots+b_{ij}x_j+\cdots+b_{in}x_n \tag{4}$$

$$f(\boldsymbol{X})=\sum_{i=1}^{Q}y_i(\boldsymbol{X})\beta_i(\boldsymbol{X})/\sum_{i=1}^{Q}\beta_i(\boldsymbol{X}) \tag{5}$$

$$\beta_i(\boldsymbol{X})=\prod_{j=1}^{n}A_{ij}(x_j) \tag{6}$$

$$A_{ij}(x_j)=p_{ij}(x_j) \tag{7}$$

其中：$Q_i(i=1,2,\cdots,Q)$为第 i 条规则；$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^{\mathrm{T}}$为输入矢量；$A_{ij}$为模糊集合；$y_i(\boldsymbol{X})$为第 i 条规则的输出；$f(\boldsymbol{X})$为控制器的输出；$\beta_i(\boldsymbol{X})$为第 i 条规则所满足的隶属度；$p_{ij}(x_j)$为输入论域的隶属度函数。

建立双输入-单输出的 T-S 模糊控制器，以车身速度 $\dot{x}_1$、车身加速度 $\ddot{x}_1$ 作为输入，主动控制力 F 作为输出。输入变量的模糊论域分别为[－0.1，0.1]和[－1.6，1.6]，输出变量的模糊论域为[－1，1]，初始量化因子 $k_e=k_{ec}=1$，初始比例因子 $k_u=300$，根据控制效果反复调试确定量化因子和比例因子的大小值。采用 7 个语言模糊子集{NB（负大），NM（负中），NS（负小），Z（零），PS（正小），PM（正中），PB（正大）}，为保证算法的输出平滑过渡，其隶属函数采用高斯型。

选用以车身加速度、悬架动挠度、轮胎动载荷为主要指标的评价函数，仿真时间为 10 s，步长为 0.01，获取 1 000 组以车身速度 $\dot{x}_1$、车身加速度 $\ddot{x}_1$ 为输入，主动控制力 F 为输出的数据。将数据导入 Matlab 工具箱中，采用 ANFIS 对获得的数据进行训练，从而构建基于 ANFIS 的变论域 T-S 模糊控制器。

2.2　参数自适应型伸缩因子设计

笔者在传统指数函数型伸缩因子的基础上[10]，根据控制系统误差 $e(t)$ 和误差变化率 $e_c(t)$ 设计了可以实时调整的新型伸缩因子参数 τ_i

$$\tau_1=\frac{E_1}{|e(t)|(E_1+E_2)+\varepsilon}+\frac{E_2}{|e_c(t)|(E_1+E_2)+\varepsilon} \tag{8}$$

其中：$\tau_i(i=1,2,3,4)$为伸缩因子设计参数，且 $\tau_i\in[0,1]$；E_1，E_2为输入变量的模糊论域边界值；ε 为充分小的正数，保证分母不为 0。

为了兼顾控制系统的协调性、响应速度、稳态精度、超调量等性能[11]，取 $\tau_2=\tau_3=\tau_4=\tau_1$。自适应型伸缩因子为

$$\begin{cases}\alpha(e(t))=\left(\dfrac{|e(t)|}{E_1}\right)^{\tau_1}+\varepsilon\\ \alpha(ec(t))=\left(\dfrac{|e_c(t)|}{E_2}\right)^{\tau_2}+\varepsilon\\ \beta(e(t),ec(t))=\dfrac{\alpha(e(t))+\alpha(e_c(t))}{2}+\varepsilon\end{cases} \tag{9}$$

伸缩因子需要满足对偶性、近零性、单调性、正规性和协调性等公理[12]，因为自适应型伸缩因子的指数参数 $\tau_i\in[0,1]$，底数形式和原来保持一致，因此，容易证明自适应型伸缩因子可以满足对偶性、近零性、单调性、正规性和协调性等性质，从而满足变论域控制中伸缩因子稳定性的条件。

将自适应型伸缩因子和建立的基于 ANFIS 的 T-S 模糊控制器相结合，建立车辆主动悬架 VUFC-AEF 控制策略，如图 3 所示。

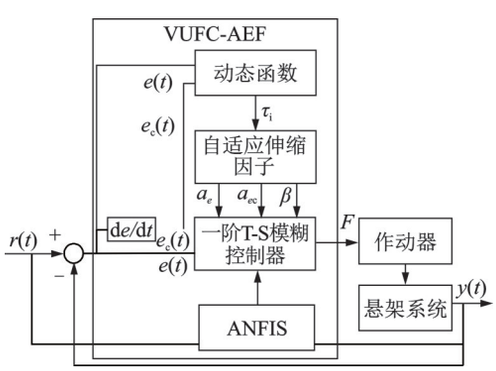


图 3　车辆主动悬架 VUFC-AEF 控制策略

Fig.3　The VUFC-AEF control strategy of vehicle active suspension

3　仿真分析

3.1　随机路面工况仿真

某国产 SUV 在不同等级随机路面上进行车辆 VUFC-AEF 主动悬架的动力学仿真。车辆悬架系统参数如表 1 所示。以车身加速度、悬架动挠度及轮胎动载荷的均方根和最大值作为控制效果评价指标，与被动悬架（passive suspension，简称 PS）、传统函数型变论域模糊控制（variable-universe fuzzy control based on traditional function，简称 VUFC-TF）进行对比分析，从而验证所提出算法的有效性。

采用有理函数滤波白噪声法计算随机路面的不平度，路面激励的计算公式为

$$\dot{q}=-0.111\left[vq+40\sqrt{G_q(n_0)v}\,w_0(t)\right] \tag{10}$$

表 1 车辆悬架系统参数

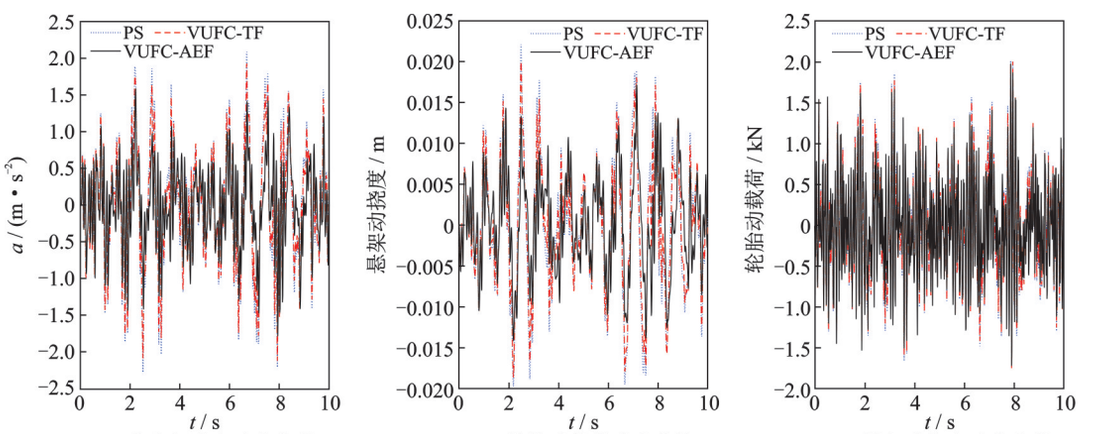
Tab.1 Parameters for vehicle active suspension

车辆参数	数值
簧载质量/kg	423.65
非簧载质量/kg	66.35
悬架刚度/(N•m^{-1})	37 100
轮胎刚度/(N•m^{-1})	218 900
悬架阻尼/(N•s•m^{-1})	1 200

其中：v为车速；$G_q(n_0)$为路面不平度系数；$w_0(t)$为白噪声；q为路面位移激励。

车辆以 70 km/h 的速度在 B 级随机路面上行驶，计算得到 PS，VUFC-TF，VUFC-AEF 控制的车身加速度、悬架动挠度及轮胎动载荷的响应曲线。图 4 为随机路面下车辆响应曲线。其中：VUFC-TF 控制下 τ_1，τ_2，τ_3，τ_4 分别取 0.9，0.8，0.9 和 0.8；对于 VUFC-AEF 按上述进行设计。

从图 4 可知，相较于 PS，VUFC-AEF 控制的车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷的均方根值（root mean square value，简称 RMS）和最大值（maximum value，简称 MAX）均明显降低，RMS 分别优化 31.33%，27.82% 和 6.1%，VUFC-TF 控制的 RMS 分别优化 7.9%，7.8% 和 2.2%。可见，VUFC-AEF 的控制效果较 VUFC-TF 有较大程度的提升，可有效提高车辆平顺性和操纵稳定性。



(a) 车身加速度响应曲线 (a) Vehicle body acceleration

(c) 轮胎动载荷响应曲线 (c) The tire dynamic loads

(b) 悬架动挠度响应曲线 (b) The suspension dynamic deflection

图 4 随机路面下车辆响应曲线

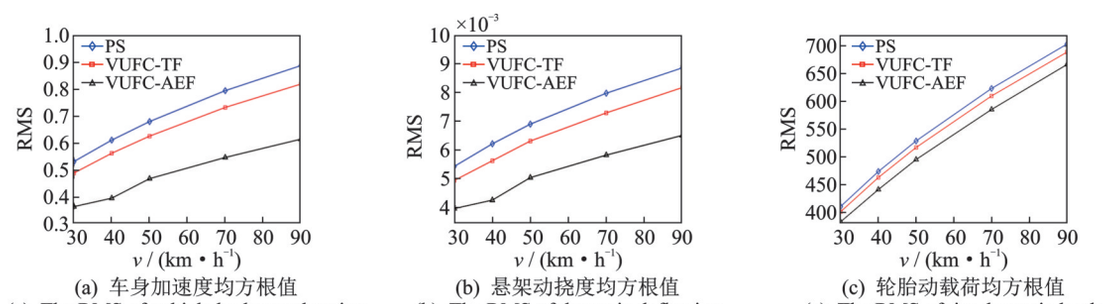
Fig.4 The vehicle response curve under random road surface

3.2 控制策略的工况适应性

3.2.1 车速的影响

为了研究不同车速下 VUFC-AEF 的控制效果，设定车速分别为 30，40，50，70 和 90 km/h，在 B 级随机路面上进行仿真，得到悬架系统的车身加速度、悬架动挠度、轮胎动载荷的均方根值。不同车速下车辆响应的 RMS 变化趋势如图 5 所示。部分随机路面悬架系统性能指标如表 2 所示。

从图 5 和表 2 可知，在不同车速工况下，相较于 PS，VUFC-AEF 控制的车身加速度、悬架动挠度、轮胎动载荷的 RMS 分别优化 35%，25% 和 7% 左右，各项指标的最大值优化效果均较好，且明显优于 VUFC-TF，具有较强的自适应性。



(a) 车身加速度均方根值 (a) The RMS of vehicle body acceleration

(b) 悬架动挠度均方根值 (b) The RMS of dynamic deflection

(c) 轮胎动载荷均方根值 (c) The RMS of tire dynamic loads

图 5 不同车速下车辆响应的 RMS 变化趋势

Fig.5 The RMS of vehicle response for different speeds

表 2　部分随机路面悬架系统性能指标

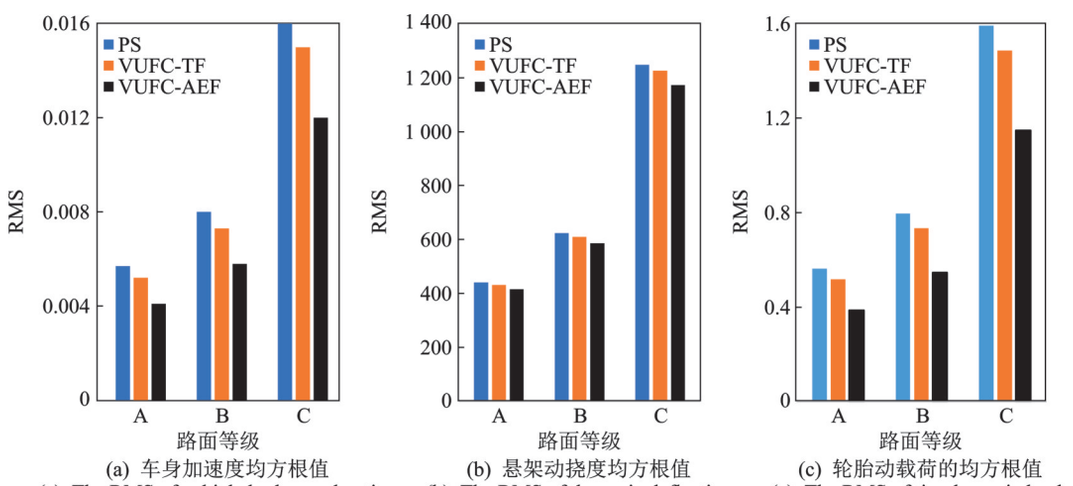
Tab.2　The performance index for suspension system with random roads

路面等级	v/(km•h^{-1})	悬架类型	车身加速度/(m•s^{-2})		悬架动挠度/m		轮胎动载荷/N	
			最大值	RMS 值	最大值	RMS 值	最大值	RMS 值
B	40	PS	1.586	0.610 8	0.016 5	0.006 2	1 566	474.1
		VUFC-TF	1.463	0.561 8	0.014 8	0.005 6	1 547	463.3
		VUFC-AEF	1.190	0.394 3	0.011 8	0.004 2	1 459	441.6
B	70	PS	2.088	0.795 2	0.022 1	0.008 0	2 021	623.8
		VUFC-TF	1.929	0.732 6	0.020 0	0.007 3	2 010	601.3
		VUFC-AEF	1.564	0.546 1	0.017 3	0.005 8	1 972	585.9
C	40	PS	3.171	1.222 0	0.032 9	0.012 3	3 111	948.2
		VUFC-TF	2.915	1.137 0	0.030 0	0.011 4	3 108	929.3
		VUFC-AEF	2.464	0.870 9	0.027 0	0.009 2	2 965	885.9
C	70	PS	4.176	1.590 0	0.044 3	0.016 0	4 041	1 248
		VUFC-TF	3.857	1.484 0	0.041 0	0.015 0	4 040	1 227
		VUFC-AEF	3.129	1.147 0	0.003 50	0.011 9	3 981	1 173

3.2.2　*路面激励等级的影响*

为了进一步验证 VUFC-AEF 算法的自适应性，在车速为 70 km/h 时分别设定 A，B，C 级随机路面，计算得到系统的车身加速度、悬架动挠度以及轮胎动载荷均的方根值。不同路面下车辆响应的均方根值如图 6 所示。

从图 6 和表 2 可知，在不同路面等级下，相较于 PS，VUFC-AEF 控制的车身加速度、悬架动挠度、轮胎动载荷的均方根值和最大值优化效果较好，其中车身加速度指标优化超过 30%，控制效果明显优于 VUFC-TF。以上分析表明，在不同车速和路面等级下，VUFC-AEF 算法均具有较好的控制效果，表现出较强的适应性和鲁棒性，能够有效提高车辆的行驶平顺性。



(a) 车身加速度均方根值　(b) 悬架动挠度均方根值　(c) 轮胎动载荷的均方根值

(a) The RMS of vehicle body acceleration　(b) The RMS of dynamic deflection　(c) The RMS of tire dynamic loads

图 6　不同路面下车辆响应的均方根值

Fig.6　The RMS of vehicle response for different loads

4　实验验证

目前，实验方法主要包括实车实验和模型实验 2 种。陈长征等[13]建立了考虑相关约束条件的车辆主动悬架预瞄控制模型，利用实验进行了验证，然而所建立的实验模型和选用的车辆参数存在较大差异。为了保证实验的有效性，采用基于相似理论的模型实验方法，建立缩尺实验模型与结构原型之间的动力学相似准则进行主动悬架实验验证，成为重要的实验手段。

4.1　相似理论分析

笔者基于相似理论，以车身加速度为主要实验

目标进行实验验证，忽略车轮及以下部分。模型比例实验台（模型车）选用加拿大Quanser公司的1/4主动悬架实验台。主动悬架实验中，与实验目的密切相关的物理量包括力F、时间t、长度l、质量m、刚度k、阻尼c、速度$\dot{x}$和加速度$\ddot{x}$等因素。建立相似准则的函数关系为

$$f(F,l,t,m,k,c,\dot{x},\ddot{x})=0 \tag{11}$$

选取由质量量纲M、长度量纲L、时间量纲T组成基本量纲系统，根据因次和谐条件得到车辆主动悬架系统的指数π矩阵如表3所示。

表3 指数π矩阵

Tab.3 The exponential matrix of π

序号	F	$\dot{x}$	$\ddot{x}$	k	c	m	l	t
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
π_1	1	0	0	0	−1	0	−1	1
π_2	0	1	0	0	−1	0	0	1
π_3	0	0	1	0	0	0	−1	2
π_4	0	0	0	1	−1	0	0	1
π_5	0	0	0	0	−1	1	0	−1

根据表3得到相似准则为$\pi_1=\dfrac{Ft}{cl}$，$\pi_2=\dfrac{\dot{x}t}{c}$，$\pi_3=\dfrac{\ddot{x}t^2}{l}$，$\pi_4=\dfrac{kt}{c}$，$\pi_5=\dfrac{m}{tc}$。其中：$\pi_1$～$\pi_5$为无量纲参数。

设λ为原型车和比例实验台之间的相似比尺，由于原型车和模型车（模型实验台）均处于重力场下，即加速度比尺$\lambda_{\ddot{x}}=\lambda_g=1$，由相似准则得到各物理量比尺的关系为$\lambda_t=\lambda_l^{1/2}$，$\lambda_c=\lambda_l^{5/2}$，$\lambda_m=\lambda_l^3$，$\lambda_{\dot{x}}=\lambda_l^{1/2}$，$\lambda_k=\lambda_l^2$，$\lambda_F=\lambda_l^3$。根据原型车和模型车簧载质量之间的关系，结合实验的主要目标，综合考虑相关影响因素，取原型车与模型车之间的比尺为5.5。

4.2 实验结果

结合实验室主动悬架实验台的可作动范围，选用B级随机路面作为主动悬架实验台的路面激励输入，车速分别为10，20，30和40 km/h进行实验。图7为1/4车辆主动悬架实验台现场图。同时，在Matlab/Simulink中搭建原型车辆主动悬架系统进行仿真，得到仿真原型车和实验模型车在B级路面速度为20 km/h时的车身加速度响应，如图8所示。

从图8可知，比例实验台采集的模型车与仿真原型车的车身加速度变化趋势基本一致，B级路面下原型车和模型车的车身加速度均方根值分别为0.351 2 m/s^{2}和0.359 8 m/s^2，可以满足原型车与模型车车身加速度相似比为1的要求。

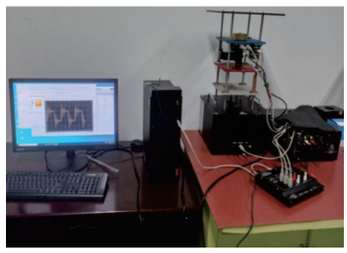


图7 1/4车辆主动悬架实验台现场图

Fig.7 The test site of 1/4 vehicle

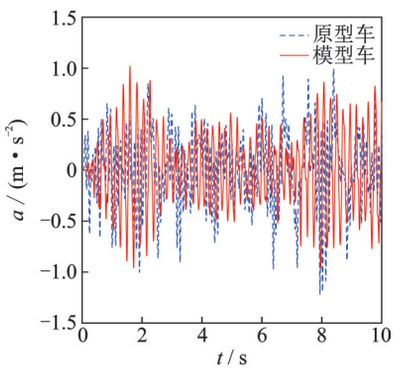


图8 B级路面速度为20 km/h的车身加速度响应

Fig.8 The acceleration with B-class road and 20 km/h

不同车速下车身加速度均方根值如图9所示。可以看出，原型车与模型车的车身加速度均方根值变化趋势基本一致，数值基本相等，最大相对误差为2.4%，满足原型车与模型车车身加速度比为1的要求，说明利用比例实验台进行缩尺实验能够较好地模拟原型车的动力学特性，从而验证所提出的VUFC-AEF控制策略的有效性。

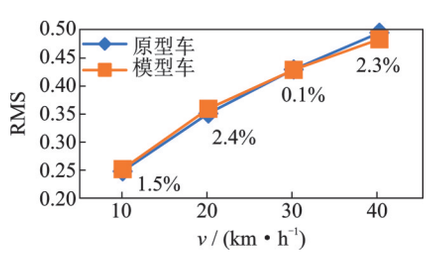


图9 不同车速下车身加速度均方根值

Fig.9 The RMS of body acceleration at different speeds

5 结 论

1）在不同车速、路面等级下，提出的VUFC-AEF控制策略均具有较好的控制效果。相比于VUFC-TF，车身加速度的均方根值优化效果可提高25%～37%，悬架动挠度和轮胎动载荷的优化效果可提高4%～34%，说明所提出的控制策略具有较强的工况适应性，适用于多变工况的车辆悬架系统振动控制。

2）在基于相似理论的缩尺实验中，模型车和原型车的车身加速度均方根值的变化趋势基本一致，数值指标误差小于5%，符合缩尺实验相似比的要求，表明模型车能够较好地反映原型车的动力特性，从而验证所提出控制策略的有效性。

参　考　文　献

[1] 寇发荣，武江浩，景强强，等．1/4车辆电磁混合主动悬架容错控制[J]．振动、测试与诊断，2022，42(1)：96-102.
KOU Farong，WU Jianghao，JING Qiangqiang，et al. Fault tolerant control of electro-magnetic hybrid active suspension for quarter vehicle[J]. Journal of Vibration，Measurement and & Diagnosis，2022，42(1)：96-102.(in Chinese)

[2] AELA A M，KENNE J P，MINTSA H A. Adaptive neural network and nonlinear electrohydraulic active suspension control system[J]. Journal of Vibration and Control，2022，28(3/4)：243-259.

[3] LIU J，LI X J，ZHANG X L，et al. Modeling and simulation of energy-regenerative active suspension based on BP neural network PID control[J]. Shock and Vibration，2019，2019：4609754.

[4] 李以农，朱哲葳，郑玲，等．基于路面识别的主动馈能悬架多目标控制与优化[J]．交通运输工程学报，2021，21(2)：129-137.
LI Yinong，ZHU Zhewei，ZHENG Ling，et al. Multi-objective control and optimization of active energy-regenerative suspension based on road recognition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2021，21(2)：129-137.(in Chinese)

[5] 孙万泉，张宁．大型水电机组轴系统的MRD模糊振动控制[J]．振动工程学报，2020，33(6)：1263-1271.
SUN Wanquan，ZHANG Ning. MRD fuzzy vibration control of the large-scale hydro-generator shafting[J]. Journal of Vibration Engineering，2020，33(6)：1263-1271.(in Chinese)

[6] 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 magneto-rheological semi-active suspension in armored vehicles[J]. Automotive Engineering，2013，35(8)：735-739.(in Chinese)

[7] 庞辉，刘凡，王延．某越野汽车磁流变半主动悬架变论域模糊控制[J]．振动、测试与诊断，2019，39(2)：311-319.
PANG Hui，LIU Fan，WANG Yan. Variable universe fuzzy control strategy for magneto-rheological semi-active suspension of cross country car[J]. Journal of Vibration，Measurement and & Diagnosis，2019，39(2)：311-319.(in Chinese)

[8] 王大勇，王慧．基于变论域模糊控制的车辆半主动悬架控制方法[J]．中国机械工程，2017，28(3)：366-372.
WANG Dayong，WANG Hui. Control method of vehicle semi active suspensions based on variable universe fuzzy control[J]. China Mechanical Engineering，2017，28(3)：366-372.(in Chinese)

[9] 王其东，王祺明，陈无畏．磁流变半主动悬架变论域模糊控制研究[J]．振动工程学报，2009，22(5)：512-518.
WANG Qidong，WANG Qiming，CHEN Wuwei. Advanced variable universe fuzzy control of with magneto-rheological suspension[J]. Journal of Vibration Engineering，2009，22(5)：512-518.(in Chinese)

[10] LONG Z Q，YUAN Y，LONG W. Designing fuzzy controllers with variable universes of discourse using input-output data[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2014，36：215-221.

[11] DING X K，LI R C，CHENG Y，et al. Design of and research into a multiple-fuzzy PID suspension control system based on road recognition[J]. Processes，2021，9(12)：2190-2190.

[12] 柳江，林晨，叶明，等．馈能悬架变论域模糊控制[J]．上海交通大学学报，2016，50(8)：1139-1143，1151.
LIU Jiang，LIN Chen，YE Ming，et al. Variable universe fuzzy control of energy-regenerative suspension[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2016，50(8)：1139-1143，1151.(in Chinese)

[13] 陈长征，王刚，于慎波．考虑时变输入时滞及频段约束的车辆主动悬架预瞄控制[J]．机械工程学报，2016，52(16)：124-131.
CHEN Changzheng，WANG Gang，YU Shenbo. Preview control of vehicle active suspensions with time-varying input delay and frequency band constraints[J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(16)：124-131.(in Chinese)

第一作者简介：李韶华，女，1973年7月生，博士、教授、博士生导师。主要研究方向为车辆动力学与智能控制。曾发表《电动汽车机-电-路耦合系统建模及动力学分析》(《机械工程学报》2021年第57卷第12期)等论文。
E-mail：lishaohua@stdu.edu.cn

通信作者简介：季广港，男，1992年2月生，博士生。主要研究方向为车辆动力学与控制。
E-mail：1425252655@qq.com