

基于磁流变减振器的汽车半主动悬架 非线性控制方法*

李以农 郑 玲

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要：考虑磁流变减振器阻尼力和悬架弹性元件非线性特性，建立车辆半主动悬架非线性动力学模型。应用微分几何非线性控制，经过适当的非线性状态和反馈变换，实现半主动悬架非线性系统的精确线性化，并对系统实施非线性状态反馈控制；根据预定的控制目标及模糊控制策略调节控制参数，设计模糊控制器，对悬架系统进行了控制仿真研究；利用神经网络模式识别能力对输入数据处理辨别，设计控制网络层，从而达到提高悬架工作性能，改善汽车行驶舒适性的目的。将三种非线性控制方法的仿真结果进行分析比较表明：经模糊控制或神经网络控制后的悬架承受的冲击响应小、振动强度低，比微分几何控制能获得更优异的性能。

关键词：半主动悬架 非线性控制 磁流变减振器 微分几何 模糊 神经网络

中图分类号：U463

0 前言

悬架是汽车的重要总成之一，它对汽车的平顺性、操稳性等性能有很大的影响。以控制阻尼为目的的半主动悬架，因结构简单，成本低，减振效果好，具有广阔的应用前景。半主动悬架的阻尼可控减振器是依据调节阻尼通道的有效面积或调节阻尼油的流动特性进行设计的。由于悬架弹性和阻尼元件不同程度地具有非线性^[1]，因此汽车悬架是一典型的非线性系统。在研究悬架的主动与半主动控制问题中，许多研究者将悬架近似为线性系统进行研究，采用常规的控制方法，研究结果存在很大的局限性^[2]。近十几年来，采用非线性控制方法研究汽车悬架的主动与半主动控制问题已成为国内外研究的热点。B.B. Hall 等^[3]建立了一种双筒减振器结构的非线性模型用于 1/4 车的悬架系统建模与仿真之中。J. Wallaschek 提出了减振器非线性数学模型谐波及统计线性化的方法^[4]。F.H. Besinger 等^[5]提出了减振器的多参数非线性简单微分方程。S. Duym^[6]用一种代数形式的经验公式来描述减振器的非线性特性，仿真与实验结果基本吻合。参考文献[7]运用微分几何方法对主动悬架进行了研究。众多研究表明，考虑悬架系统的非线性及控制具有重要的理论与实际意义。下面在车辆 1/4 半主动悬架模型中考虑了磁流变减振器的非线性阻尼特性及弹性元件的非线性特性，利用多种非线性控

制方法对悬架系统进行仿真研究。

1 半主动悬架非线性模型

磁流变减振器利用磁流变液可受外加磁场控制的流变特性，实现减振器阻尼系数的可控，从而调节阻尼力^[8]。描述磁流变液减振器的力学模型采用非线性 Bingham 塑性模型，其阻尼力包括粘性阻尼力和库仑阻尼力，可用下式描述^[9]

$$F_e = k_e x_p + c_e \dot{x}_p + P_{mr} \operatorname{sgn} \dot{x}_p$$

$$k_e = \frac{A_r^2}{C_g}$$

$$c_e = (A_p - A_r)^2 \frac{12hL}{2\pi r h^3} \quad (1)$$

$$H = \frac{nI}{2h_m}$$

式中 x_p, \dot{x}_p —— 活塞相对位移和相对运动速率
 k_e —— 等效刚度系数
 c_e —— 磁流变液因粘度产生的等效阻尼系数
 A_p, A_r —— 活塞和活塞杆面积
 C_g —— 气体腔内气体的顺应性系数
 h —— 磁流变液的粘度
 L —— 磁流变减振器内缸的长度
 r —— 内缸的外部半径
 h —— 内、外缸体间隙
 L_m —— 磁极长度

* 国家自然科学基金(51035030)和重庆大学骨干教师基金(2002325)资助项目。20040709 收到初稿，20041221 收到修改稿

h_m —— 磁极间的间隙
 H —— 磁场强度
 n —— 线圈匝数
 a, b —— 试验拟合参数

弹性元件的非线性是悬架非线性特性的一个重要因素,变刚度弹簧已在汽车悬架系统中得到应用,以变截面弹簧为例,其力-位移关系如下^[10]

$$F_s = k_s(y_2 - y_1) + e k_s(y_2 - y_1)^3 \quad (2)$$

式中 e —— 小参数, $e > 0$

k_s —— 非线性弹簧刚度

考虑悬架的非线性弹性及磁流变减振器,等效弹簧力 F_e 为

$$F_e = F_s + k_e(y_2 - y_1) = k'_e(y_2 - y_1) + e k_s(y_2 - y_1)^3 \quad (3)$$

式中 $k'_e = k_s + k_e$, 是非线性弹簧和磁流变减振器的等效刚度。

考虑磁流变减振器和弹性元件非线性特性的 1/4 悬架模型如图 1 所示,运动微分方程如下

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_2 + f_e + c_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_c = 0 \\ m_u \ddot{x}_1 - f_e - F_c - c_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_t(y_0 - y_1) - c_t(\dot{x}_1 - \dot{y}_0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 m_s, m_u —— 悬架的簧载质量和非簧载质量

y_2, y_1 —— 簧载质量和非簧载质量的垂直位移

y_0 —— 路面干扰输入

k_t, c_t —— 轮胎的等效刚度和等效阻尼系数

F_c —— 磁流变减振器的可调阻尼力

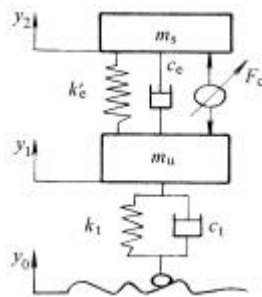


图 1 2 自由度半主动悬架

半主动悬架系统的可控阻尼力取决于悬架运动方向,所以阻尼力控制原则为

$$F_c = \begin{cases} F_c & F_c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) > 0 \\ 0 & F_c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

设定状态变量

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [y_2 - y_1 \ \dot{x}_2 \ y_1 - y_0 \ \dot{x}_1]^T$$

式中 x_1 —— 悬架动挠度

x_2 —— 簧载质量的速度

x_3 —— 非簧载质量与车轮之间的相对位移

x_4 —— 非簧载质量的速度

式(4)的状态空间表达式为一仿射非线性系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})F_c + \mathbf{D}(\mathbf{x})w \quad (6)$$

$$\text{式中 } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_2 - x_4 \\ \frac{1}{m_s}[-f_e - c_e(x_2 - x_4)] \\ x_4 \\ \frac{1}{m_u}[f_e + c_e(x_2 - x_4) - k_t x_3 - c_t x_4] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & \frac{1}{m_u} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & \frac{c_t}{m_u} \end{bmatrix}^T$$

$$w = \dot{x}_0$$

当控制力 F_c 确定后,磁流变减振器上的输入电流可按式(7)得到^[9]

$$I = \frac{2h_m}{n} \left[F_c \frac{h_m}{8aL_m(A_p - A_r)} \right]^{1/b} \quad (7)$$

2 微分几何非线性控制方法

以微分几何理论为基础的精确线性化方法将非线性系统经适当的非线性状态和反馈变换,实现状态或输入/输出的精确线性化。

考虑一个单输入单输出的仿射非线性系统^[11]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \\ y = h(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 \mathbf{x} —— 状态变量, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$

u —— 控制变量

y —— 输出变量, $y \in \mathbf{R}^m$

\mathbf{f}, \mathbf{g} —— \mathbf{R}^n 上的十分光滑的矢量场

$h(\mathbf{x})$ —— 分光滑的非线性函数

据定理^[12],如果

(1) 对于所有在 x_0 邻域的 \mathbf{x} , $L_g L_f^r h(\mathbf{x}) = 0$

(2) $L_g L_f^{r-1} h(\mathbf{x}) \neq 0$

则由式(8)所述的系统在 x_0 邻域中的相对阶为 r , 这里 L 为李导数算子。当一如式(8)所述的非线性系统的相对阶为 n 时,非线性系统具有期望动态特性的非线性反馈

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(\mathbf{x})} [-L_f^r h(\mathbf{x}) - a_0 h(\mathbf{x}) - L_{a_1} h(\mathbf{x}) - \dots - a_{n-1} L_f^{r-1} h(\mathbf{x})] \quad (9)$$

定理二:状态精确线性化问题有解,当且仅当存在函数 $h(\mathbf{x})$ 使得系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u + D(x)w \\ y &= h(x) \end{aligned}$$

在点 x_0 的相对阶为 r ，若 $r = n$ ，则系统可以精确线性化，否则为局部精确线性化。此处 $D(x)$ 为矢量场， w 为有害输入。

当存在的输出函数 $h(x)$ 满足上述条件时，可利用变换

$$z = f(x) = [h(x) \quad L_f h(x) \quad L^2 f(x) \quad \dots \quad L_f^{r-1} h(x)]^T \quad (10)$$

及反馈变换

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(x)} [-L_f^r h(x) + v(x)]$$

得到线性系统

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 \\ M & M & M & & M \\ 0 & 0 & 0 & L & 1 \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v(x) \quad (11)$$

图 1 所示半主动悬架动力学模型的状态空间表达式为仿射非线性系统，状态变量 $x \in \mathbf{R}^4$ ，可通过变换式(10)将原非线性系统转换成线性系统式(11)。

对仿射非线性系统式(6)，令 $h(x)=x_1$ 有

$$L_g L_f^0 h(x) = L_g h(x) = 0$$

$$L_g L_f h(x) = -\left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_u}\right) \neq 0$$

由此可知此悬架系统相对阶 $r = 2$ ，因此该系统可局部精确线性化。利用变换

$$z = f(x) = [h(x) \quad L_f h(x)]^T = [x_1 \quad x_2 - x_4]^T$$

半主动控制律

$$u = \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} [-L_f^2 h(x) + v(x)] = -[k'_c x_1 + e k_s x_1^3 + c_c(x_2 - x_4)] + k_t x_3 \frac{m_s}{m_s + m_u} - \frac{m_s m_u}{m_s + m_u} v(x) \quad (12)$$

得到形如式(11)的线性系统。其中 $v(x)$ 可根据线性方程： $\dot{z}_1 = z_2$ ， $\dot{z}_2 = v(x)$ 获得，即

$$v(x) = -\sum_{i=1}^2 k_i z_i = -k_1 h(x) - k_2 L_f h(x)$$

最优增益为： $K=[k_1 \quad k_2]^T$ ，基于最优控制定律状态反馈矩阵可表达为

$$K = RB^T P^* \quad (13)$$

式中 $R=[0 \quad 1]^T$ 为权矩阵， $B=[0 \quad 1]^T$ ，且 P^* 为黎卡梯矩阵方程的解，黎式方程如下

$$A^T P^* + P^* A - P^* B B^T P^* + I = 0 \quad (14)$$

式中 I —— 单位矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

故非线性半主动悬架模型转化后的线性方程为

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= v(x) \end{aligned}$$

式中 $z_1 = h(x) = x_1$

$$z_2 = \dot{z}_1 = x_2 - x_4$$

则

$$v(x) = k_1 x_1 - k_2(x_2 - x_4), \quad K = P[1 \quad \sqrt{3}]$$

控制框图如图 2 所示。设最优增益矩阵 K 中的 P 取 15。

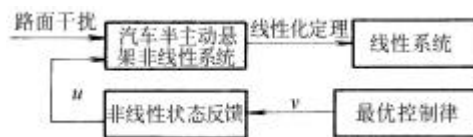


图 2 半主动悬架微分几何非线性控制系统

3 模糊控制方法

模糊控制具有超调小、鲁棒性强及能够解决非线性因素等特点，因而是解决复杂系统的一种有效控制策略，因此可以利用模糊控制方法对所建半主动悬架非线性系统如图 1 所示进行控制仿真。

以悬架非簧载质量和簧载质量的相对位移 y_2-y_1 及其变化率作为模糊控制器的输入量，记作 e, e_c ；半主动悬架的磁流变减振器可调阻尼力 F_c 作为模糊控制器的输出量，它将改变减振器的阻尼值，控制框图如图 3 所示。

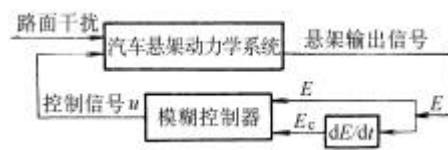


图 3 半主动悬架模糊控制系统

模糊化前先将各变量规范化，实际变量 e, e_c, u 和规范化后的变量 E, E_c 及 U 有如下关系

$$E = e/k_e$$

$$E_c = e_c/k_c$$

$$U = u/k_u$$

式中 k_e, k_c, k_u —— 控制器规范化的比例因子，由悬架输出的变化范围及相应隶属函数论域确定

以高斯型隶属函数作为输入、输出变量的隶属函数，论域按照半主动悬架系统物理意义划分，模糊控制器输入变量的论域是根据车辆路面激励产生的最大响应来确定，而输出控制力的论域定

为 $[-400\text{ N } 400\text{ N}]$ 。它们所属模糊集的论域分别为： $E \in [-1\ 1], E_c \in [-1\ 1], U \in [-1\ 1]$ 。

模糊化策略采用单点模糊化，控制元规则：如果 E 和 E_c 二者都为零， $U=0$ ，保持现状；如果 E 以满意的速率趋向零， $U=0$ ，保持现状；如果 E 不是自校正， U 不为零，取决于 E 和 E_c 的符号和大小。根据以上规则设计模糊控制器，规则库采用一组模糊控制规则如下

R_n : if e is A_n and e_c is B_n , then u is C_n , $n=1, 2, 3, \dots$

式中 A_n 是 e 的模糊集合， B_n 是 e_c 的模糊集合， C_n 是 u 的模糊集合。 E, E_c 和 U 分别用 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB 语言变量表示。

设计的模糊规则库如表 1 所示。在各个论域上，隶属函数子集分别取为 NB, M, NS, ZE, PS, PM, PB。总共模糊规则库的规则集为 7×7 条。

表 1 模糊控制规则

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NM	ZS	ZE	ZE	ZE	ZE
NM	NM	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM	PB
PB	ZE	ZE	ZE	ZE	PM	PB	PB

根据以上模糊推理规则、模糊判决时，模糊逻辑控制器可表示为如下形式

$$u(k) = \frac{\sum_{i=1}^M w^i y^i}{\sum_{i=1}^M w^i} \quad (15)$$

式中 $u(k)$ —— 模糊控制器的输出
 y^i —— 模糊集合 B_i 的中心，即 $u_B(y)$ 在输出空间的这一点上取得最大值
 w^i —— 第 i 条模糊规则被激活的适用度

$$w^i = \prod_{j=1}^N m_{A_j^i}(x_j)$$

$m_{A_j^i}(x_j)$ —— 输入 x_j 的隶属函数

$$m_{A_j^i}(x_j) = \exp\{-[(x_j - \bar{x}_j^i) / s_j^i]^2\}$$

\bar{x}_j^i, s_j^i —— 高斯型隶属函数的两个参数，分别表示隶属函数的中心和分散程度，取决于悬架输出误差大小

4 神经网络控制及其控制器设计

神经网络控制能解决复杂的非线性、不确定系统的控制问题。选取一定的模型结构和激活函数可

以形成各种人工神经网络，达到不同的目的。下面用神经网络来解决非线性半主动悬架的控制问题。

对图 1 所示半主动悬架设计神经网络控制器，控制框图如图 4。图中 F_c 为半主动悬架控制输入信号(阻尼力)， y 为半主动悬架系统输出信号(非簧载质量与簧载质量悬相对速度)， $e = y - \hat{y}$ 为系统偏差， \hat{y} 是辨识网络的输出，即悬架系统的估计输出， y_r 是给定的学习信号，NNI、NNC 分别为神经网络辨识器和控制器。

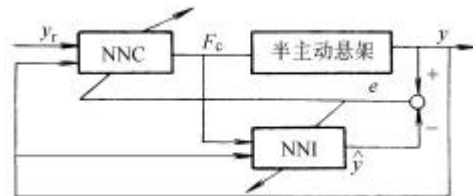


图 4 半主动悬架神经网络控制结构

4.1 悬架系统辨识网络结构及算法

设 k 时刻，辨识网络的输入信号为

$$U = [y(k), L, y(k-n+1), u(k), L, u(k-m+1)]^T \quad (16)$$

式中 $u(k)$ —— 输入控制信号系列

$y(k)$ —— 半主动悬架系统信号系列

设输入神经元为 6 个，隐含层为 7 层，建立辨识对象特性的神经网络模型如图 5。式中 $u(k)$ 为半主动悬架控制的输入， $y(k)$ 是悬架系统的输出。该模型输入层有 $n+m$ 个神经元，皆表示前一时刻获得的输入 $u(k)$ 和输出 $y(k)$ 。隐含层采用 S 型非线性激活函数，输出层为一个神经元，采用线性激活函数。

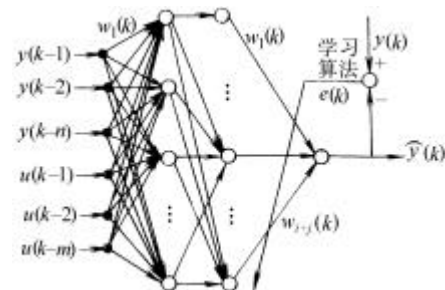


图 5 半主动悬架神经辨识模型

权值的学习采用 BP 学习规则，利用附加动量法修正权值，调整自适应学习率以加快收敛速度。

4.2 神经网络控制器的设计

图 6 为半主动悬架的神经网络控制的结构图。在神经网络结构设计时，考虑控制器实现方便可依据反馈线性化方法，使用如下模型，式中 $d \geq 2$ 。

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), L, y(k-n+1), u(k), u(k-1), L, u(k-n+1)] + g[y(k), y(k-1), L, y(k-n+1), u(k), L, u(k-n+1)]u(k+1) \quad (17)$$

控制器为

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k),L, y(k-n+1),u(k),L, u(k-n+1)]}{g[y(k),L, y(k-n+1),u(k),L, u(k-n+1)]} \quad (18)$$

式中当 $d = 2$ 时，控制器方可实现。

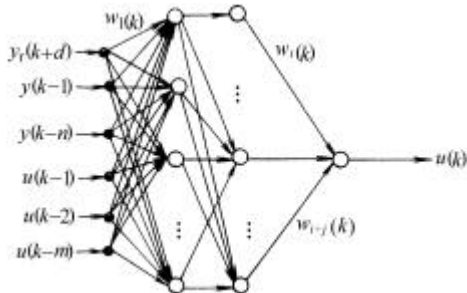


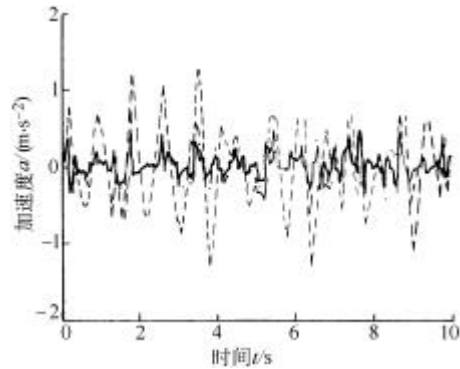
图 6 神经网络控制器

利用 MATLAB+Simulink 对系统进行仿真。在系统辨识时，采样间隔取 0.01 s，悬架系统采样点共 10 000 个，系统输入阻尼控制力为[-400 N 400 N]，神经网络训练采用 BP 算法中集动量法和自适应学习率为一体的 Traingdx 训练函数，它能够根据误差的变化趋势调整权值的学习率。

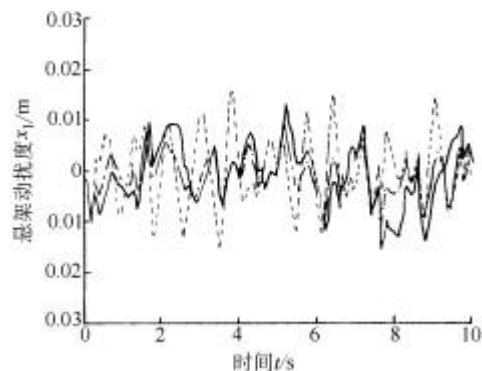
5 三种非线性控制方法的比较

设汽车以 $v=20$ m/s 匀速驶过 C 级路面，路面不平度系数为 $G_q(n_0)=2.56 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}^{-1}$ ，采样间隔为 0.1 s。与被动悬架相比，半主动悬架在微分几何、模糊逻辑和神经网络三种控制方法下的性能都得到了很大提高。图 7 为三种控制方法仿真比较的结果，悬架参数见表 2。图 7a 为分别实施三种控制方法后，悬架的加速度响应，从图 7a 中可以看出：模糊逻辑控制的效果略优于神经网络控制，而微分几何控制效果劣于前两种方法。在图 7b 悬架动扰度的仿真结果中，神经网络控制后的效果最好，模糊控制下动扰度的衰减效果要略好于微分几何控制。图 7c 和图 7d 为半主动控制悬架磁流变减振器的阻尼力及其控制输入电流，三者要求电流均在 0.7 A 内，其中模糊控制达到其控制效果需要最大电流为 0.7 A，微分几何控制需要的最大电流为 0.5 A，而神经网络仅需要 0.4 A。可见，三种控制方法能量消耗都不大，其中神经网络控制所需能量最少。从图 7e 车轮动载荷仿真结果看，微分几何控制下最大为 400 N，约是模糊控制、神经网络控制的两倍，即后两种方法抗地面冲击干扰能力要比微分几何控制强。图 7f 为车身垂直加速度功率谱密度，微分几何控制的悬架，其振动能量主要分布在 0~10 Hz 频段内，模糊控制的悬架，其能量分布在 0~2 Hz 内，

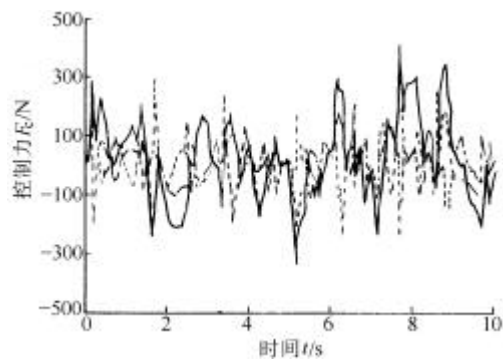
由神经网络控制的悬架能量分布在 0~5 Hz 内，其中后两种控制方法峰值相当，能量分布更均匀，并且仅仅是微分几何控制的 1/10。



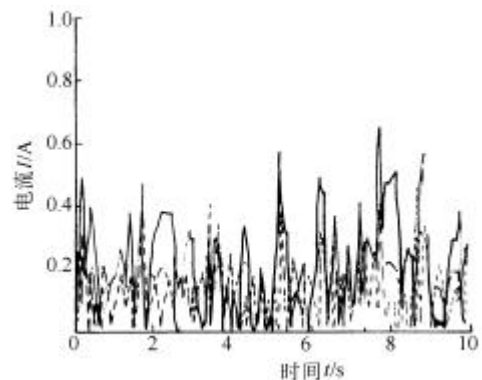
(a) 车身加速度



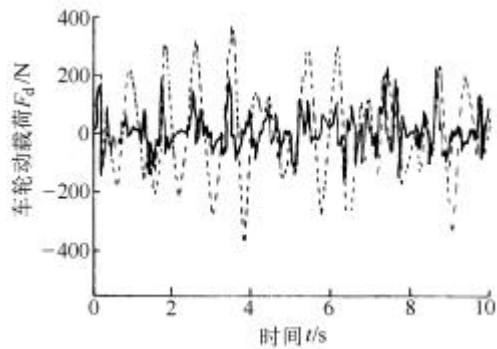
(b) 悬架动扰度



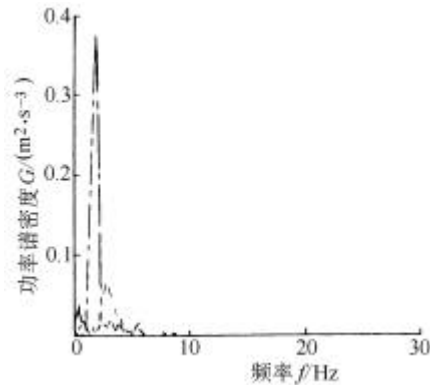
(c) 阻尼控制力



(d) 磁流变减振器的控制电流



(e)车轮动载荷



(f)车身垂直加速度功率谱密度

图 7 三种控制方法仿真结果比较

— 神经网络控制
 - - - 微分几何控制
 —— 模糊控制

表 2 仿真所用悬架系统部分参数

簧载质量 m_s / kg	非簧载质量 m_u / kg	等效刚度 $k_e / (\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
317.5	45.4	2 200
轮胎等效刚度 $k_f / (\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	轮胎等效阻尼 $c_f / (\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	等效阻尼 $c_e / (\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
192 000	5 000	500

6 结论

(1) 从车身加速度响应量来看, 模糊控制和神经网络控制方法的振动能量峰值相当, 能量分布更均匀, 且远远小于微分几何控制方法的能量。

(2) 从车轮动载荷来看, 微分几何控制要大于模糊控制和神经网络控制, 因而后两种方法的抗干扰能力要比微分几何控制强得多。

(3) 在控制中, 磁流变减振器所需的能量都不大, 其中神经网络控制消耗能量最少。

(4) 以磁流变减振器为执行器的非线性半主动悬架, 用模糊控制和神经网络控制方法能够比微分几何控制获得更优异的性能, 是具有非线性特性悬架系统的理想控制方法。

参 考 文 献

- 1 El-Demerdash S M, Crolla D A. Effect of non-linear components on the performance of a hydro-pneumatic slow-active suspension system. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1996, 210 (Part D) : 23~34
- 2 方锡邦, 陈无畏, 吴乐, 等. 汽车半主动悬架的非线性神经网络自适应控制研究. 机械工程学报, 2000, 36(1) : 76~78
- 3 Hall B B, Gill K F. Performance of a telescopic dual-tube automotive damper and implications for vehicle ride prediction. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1986, 200(2) : 115~123
- 4 Wallaschek J. Dynamics of nonlinear automobile shock absorbers. Int. J. Nonlinear Mechanics, 1990, 25(2/3) : 299~308
- 5 Besinger F H, Cebon D, Cole D J. Damper models for heavy vehicle ride dynamic. Vehicle System Dynamics, 1995, 24 : 35~64
- 6 Duym S. An alternative force state map for shock absorbers. Proc. Instn. Mech. Engrs, 1997, 211(Part D) : 175~179
- 7 王洪礼, 石磊. 汽车悬架系统非线性振动的主动控制. 机械强度, 2000, 22(3) : 164~166
- 8 廖昌荣, 陈伟民, 余森, 等. 基于混合模式的汽车磁流变减振器阻尼特性分析与测试. 机械工程学报, 2001, 37(5) : 11~14
- 9 Choi S B, Lee H S. H^∞ control performance of a full-vehicle suspension featuring magnetorheological dampers. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(5) : 341~360
- 10 赵和平, 黄宏成, 张建武, 等. 非线性弹簧汽车悬架动态特性研究. 机械强度, 2001, 23(2) : 165~167
- 11 Ian R Petersen. Disturbance attenuation & H^∞ optimization : a design method based on the algebraic riccati equation. IEEE Trans on Automatic Control, 1987, 32(5) : 427~429
- 12 胡跃明. 非线性控制系统理论与运用. 北京 : 机械工业出版社, 2002

NONLINEAR CONTROL METHODS OF AUTOMOTIVE SEMI-ACTIVE SUSPENSION BASED ON THE MR DAMPER

Li Yinong Zheng Ling

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission,
 Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract : The nonlinear dynamic model of automotive semi-active suspension is established with considering of the

nonlinear characteristics of the MR (Magnetorheological) damper and the nonlinear rigidity of springiness element. At first, the non-linear control strategy of differential geometry theory is applied to execute feedback control on the semi-active suspension. The nonlinear model of the semi-active suspension is transferred to a simple linear system through a nonlinear state feedback. Then, according to the road excitation, the predetermined control object and the fuzzy control strategy to adjust the fuzzy logic control parameters, the fuzzy controller is designed. Furthermore, the neural network controllers are designed to improve automotive ride comfort. Finally, the simulation results are made a comparison between three non-linear control methods. It is shown that the suspension used

fuzzy logic and neural network control methods has less impact response and lower vibration intensity than differential geometry theory control strategy, and has more superior performance.

Key words : Semi-active suspension Non-linear control

MR damper Differential geometry

Fuzzy logic Neural network

作者简介：李以农，男，1961 年出生，博士，教授，博士生导师。主要从事车辆系统非线性动力学控制、机械传动系统非线性振动主动、半主动控制以及转子动力学等方面的研究。

E-mail : ynli@cqu.edu.cn

《机械工程学报》被 EI 收录论文目次(2004 年第 6 期)

流体机械可靠性预测的非线性数值方法	杨 健 (1)
油膜振荡下转子疲劳的损伤力学研究	荆建平 孟 光 孙 毅等 (5)
进口节流式滑阀内流场的有限元计算与 PIV 研究	高殿荣 侯桂庆 杨林杰等 (10)
重型车辆传动桥二次调节模拟加载试验台的耦合影响与解耦	王 慧 李洪人 (19)
带缺陷的微型机械结构动力学特性分析	陈真勇 何永勇 褚福磊等 (23)
企业网络协同制造中目标分解的时序约束	董红召 陈 鹰 赵燕伟 (28)
旋转货架拣选作业优化问题的新型混合遗传算法求解	张 攀 田国会 贾 磊等 (34)
基于原子力显微镜和分子动力学的纳米压痕技术研究	霍德鸿 梁迎春 程 凯等 (39)
蜂窝密封的封严特性研究	何立东 高金吉 尹 新 (45)
复杂功能、结构关系表达及其在概念设计中应用	王玉新 杨丽艳 朱殿华 (49)
法向等距线法生成涡旋压缩机型线的研究	刘 涛 邬再新 刘振全 (55)
模具敏捷制造技术研究 with 系统开发	周雄辉 王 玉 娄臻亮等 (59)
旋转管微滤膜中不同流型下膜分离特性研究	周先桃 陈文梅 褚良银等 (65)
钴基合金—碳化钨复合涂层材料耐磨性能的研究	黄新波 贾建援 林化春等 (71)
液压系统缝隙内流体泄漏特性的分析	薛晓虎 (75)
消失模铸造充型与凝固过程的计算机仿真	李锋军 沈厚发 柳百成 (81)
基于三角 Bézier 曲面的复杂特征模型重建及特征融合技术研究	柯映林 刘云峰 (85)
产品性能评价模型研究	魏效玲 曹庆奎 潘 越 (91)
高重合度弧齿锥齿轮加工参数设计与重合度测定	邓效忠 方宗德 魏冰阳等 (95)
边界一致的 Delaunay 四面体网格稳定生成算法	赵建军 王启付 (100)
光固化快速成形过程中树脂固化零件变形的数值模拟	徐红玉 张元冲 卢秉恒等 (107)
异型螺旋曲面数控加工运动学研究与应用	姚南珣 张 辉 王殿龙 (113)
应用多色集合理论完成加工中心的概念设计	李善仓 李宗斌 唐凤鸣 (118)
基于虚拟样机技术的某型火炮开门过程动力学特性研究	杜中华 王兴贵 马吉胜 (123)
球面射电望远镜主动反射面支撑机构运动学分析	唐晓强 汪劲松 刘辛军 (127)
新型限速切断阀的流量关断特性分析	胡国良 徐 兵 杨华勇等 (132)
虚拟装配工艺规划实现技术研究	刘检华 姚 珺 宁汝新 (138)
线性摩擦焊机夹具系统弹性变形对焊接过程的影响	杜随更 常 涛 王忠平 (144)
网络协同数控机床工业设计系统中的知识获取与应用研究	张 军 赵江洪 孙宗禹 (149)
球墨铸铁球化级别的模糊评价模型	徐建林 陈 超 (155)
富氩气保焊熔池信息视觉检测方法试验研究	王克鸿 汤新臣 刘 永等 (161)
机械产品精密配合中的选配方法研究	刘明周 郭 嘉 李旗军 (165)
线结构光视觉传感器的现场标定方法	周富强 张广军 江 洁 (169)
注塑模浇注系统位置的自动设计	余晓容 申长雨 陈静波等 (174)
基于视觉图像的机加工零部件亚像素边缘定位	张永宏 胡德金 徐俊杰 (179)
考虑概率与置信度的疲劳裂纹扩展率模型及其参数测定方法	杨 冰 赵永翔 何朝明等 (183)
ABS 压力响应测试和压力的精细调节	丁能根 潘为民 方裕固 (188)
柴油机表面噪声源识别的试验研究	岳东鹏 郝志勇 刘月辉等 (192)
电火花强化 WC92Co8 复合层界面行为研究	汪瑞军 钱乙余 刘 军 (196)