

文章编号:1671-1637(2006)04-0066-05

# 汽车半主动空气悬架的神经网络控制方法

朱思洪,吕宝占,王辉,张莹,贺亮

(南京农业大学 工学院,江苏 南京 210031)

**摘要:**为了提高汽车半主动悬架的控制效果,以空气弹簧压力为控制对象,应用自适应神经网络控制方法,进行了不同路面激励下的半主动空气悬架的车身垂直加速度、悬架动挠度和车轮动载荷的计算机仿真和实验研究,并与被动悬架系统的相应参数进行了对比。发现在白噪声路面和较低频率的正弦路面激励下,半主动空气悬架采用自适应神经网络控制能够明显降低车身垂直加速度、车轮动载荷和悬架动挠度,降低范围为16%~85%,提高了车辆的操纵稳定性,改善了车辆的行驶安全性与乘坐舒适性。

**关键词:**车辆工程;空气悬架;神经网络控制方法;仿真;实验研究

**中图分类号:**U463.33 **文献标识码:**A

## Neural network control method of automotive semi-active air suspension

Zhu Si-hong, Lu Bao-zhan, Wang Hui, Zhang Ying, He Liang

(School of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to improve the control effect of vehicle semi-active suspension, adaptive neural network control method was developed, the air pressure of spring was taken as controlled object, the computer simulation and experiment of body plumb acceleration, suspension dynamic deflection and wheel dynamic load with semi-active air suspension under the excitations of different road surfaces were studied, the control result of neural network control suspension was compared with the control effect of passive suspension. Under the excitations of white noise roads and lower frequency sinusoid roads, the result shows that the semi-active suspension with the method not only markedly reduces body plumb acceleration, wheel dynamic load, suspension dynamic deflection, the decreased range is from 16% to 85%, but also improves automotive driving stability, riding comfortable performance and running security. 3 tabs, 5 figs, 15 refs.

**Key words:** vehicle engineering; air suspension; neural network control method; simulation; experimental study

**Author resume:** Zhu Si-hong(1962-), male, PhD, professor, 86-25-58606603, zsh@njau.edu.cn.

## 0 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。而近些年来出现的动力学参数可调的半主动悬架,由于性能优良,制造工艺相对简单,价格低廉,已成为改善车辆性能的主要途径之一。半主动空气弹簧具有振动频率低,刚度可调,阻尼可控,噪声小和使用寿命长等优点,因此在半主动悬架中具有广泛的应

收稿日期:2006-06-22

基金项目:教育部优秀青年教师计划项目(2001-1829)

作者简介:朱思洪(1962-),男,湖北监利人,南京农业大学教授,工学博士,从事机械现代设计理论及方法与车辆振动及控制研究。

用前景。

在半主动空气悬架中,空气弹簧刚度调节的方法之一是改变气室的空气压力。由于具有较强的非线性、较大的时间滞后以及车辆数学模型中某些参数的不确定性,使得半主动空气悬架成为一个复杂的非线性系统,采用常规的最优控制和自适应控制策略有一定的局限性<sup>[1-3]</sup>。神经网络自适应控制以其结构和算法简单,工程上易于实现等特点,在研究车辆空气悬架的控制方面具有现实意义。

本文以半主动空气悬架为例,对最具有代表性的 2 自由度 1/4 车体模型进行研究,既保留了许多最主要的特性,又避免了整车研究的复杂性<sup>[4]</sup>。在仿真研究中,分别以白噪声和正弦波为路面激励,对比分析了被动悬架和神经网络自适应控制半主动悬架的车身加速度、悬架动挠度和车轮动载荷 3 项指标及其对应的均方根值,对不同频率正弦波路面激励下的车身垂直加速度进行了研究。

### 1 空气悬架系统的结构与数学模型

半主动空气悬架系统的物理结构和数学模型见图 1,该系统已经成功地进行了各种主动(半主动)悬架控制策略车身垂直振动和车轮相对动载的试验验证。车身质量由空气弹簧支撑,控制系统根据各传感器测得的信号,控制充、放气电磁阀的开、关,改变空气弹簧的工作压力,从而实现对身体振动特性的控制。由相关研究和分析<sup>[5-7]</sup>可得出,空气弹簧的阻尼力和弹性力可表示为

$$\begin{cases} F_c = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ F_k = k_0(x_1 - x_2) + k_r(x_1 - x_2) \end{cases}$$

式中: $c$  为空气弹簧阻尼; $k_0$  为空气弹簧基值刚度; $k_r$  为空气弹簧可调刚度; $x_1$  为非簧载质量位移; $x_2$  为簧载质量位移。

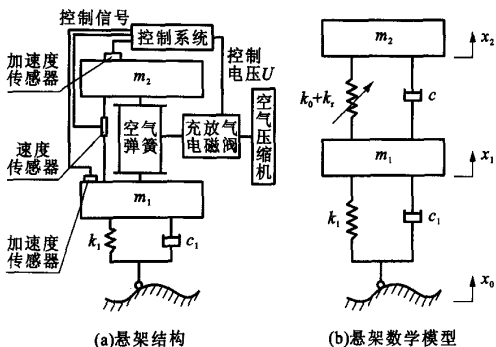


图 1 悬架结构与数学模型

Fig. 1 Structure and mathematical model of suspension

由牛顿第二运动定律,可得到半主动悬架系统的振动微分方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_0) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (k_0 + k_r)(x_1 - x_2) = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - (k_0 + k_r)(x_1 - x_2) = 0 \end{cases}$$

式中: $k_1$  为轮胎刚度; $m_1$  为非簧载质量; $m_2$  为簧载质量; $k_1(x_0 - x_1)$  为车轮动载荷; $x_2 - x_1$  为空气悬架动挠度; $\ddot{x}_2$  为车身加速度。

在主频带内路面激励速度  $\dot{x}_0$  可近似处理为白噪声,即

$$w = \dot{x}_0(t)$$

取状态变量为

$$y_1 = \ddot{x}_2$$

$$y_2 = k_1(x_1 - x_2)$$

$$\mathbf{X} = [x_1 - x_0 \quad x_2 - x_1 \quad \dot{x}_1 \quad \dot{x}_2]^T$$

则悬架系统的控制方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}w \\ \mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X} \end{cases}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ -\frac{k_1}{m_1} & \frac{k_0 + k_r}{m_1} & -\frac{c + c_1}{m_1} & \frac{c}{m_1} \\ 0 & -\frac{k_0 + k_r}{m_2} & \frac{c}{m_2} & -\frac{c}{m_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \frac{c_1}{m_1} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{k_0 + k_r}{m_2} & \frac{c}{m_2} & -\frac{c}{m_2} \\ 0 & -k_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 2 神经网络自适应控制器设计

#### 2.1 结构设计

半主动空气悬架是一个非常复杂的动态系统,它既包含有非线性特性及一些未知的变化特性,还含有随机性。本文采用的基于神经网络的自适应控制结构框图见图 2。系统主要由 3 部分组成:被控对象半主动悬架、三层神经网络辨识器  $NN_1$ 、三层神经网络控制器  $NN_2$ 。 $NN_1$  用来对半主动悬架系统进行在线辨识,同时为  $NN_2$  提供误差传递通道; $NN_2$  作为神经网络控制器通过对网络权系数和阈值的在线调整来实现网络参数的调整,从而获得最佳的减振效果。 $y_d$  为车身振动加速度期望输出, $y$  为车身振动加速度实际输出, $r$  为悬架系统的路面速度随机输入。神经网络控制器  $NN_2$  的输入变量

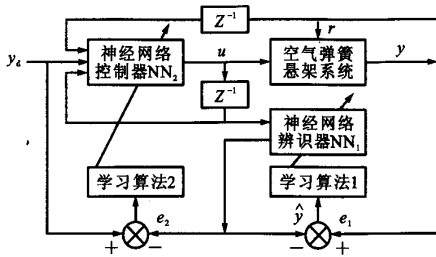


图2 控制结构

Fig.2 Control structure

为车身振动加速度的均方根值,神经网络辨识器 \$NN\_1\$ 的输入量为车身振动加速度和可控量 \$u\$。\$NN\_1\$ 和 \$NN\_2\$ 网络均可由经验知识首先进行离线训练,然后再进行在线学习控制。

2.2 神经网络辨识器设计原理

路面速度输入为一白噪声,\$NN\_1\$ 结构见图3。将待辨识的半主动空气悬架系统看作一个单输入单输出(SISO)系统,车身振动加速度可以用非线性自回归滑动平均模型来描述<sup>[8-9]</sup>,即

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-m), r(k-1), \dots, r(k-n))$$

式中:\$y(k)\$ 为车身的振动加速度在 \$k\$ 时刻的值;\$r(k-1)\$ 为路面随机输入(白噪声);\$f(\cdot)\$ 为被控对象的非线性函数。

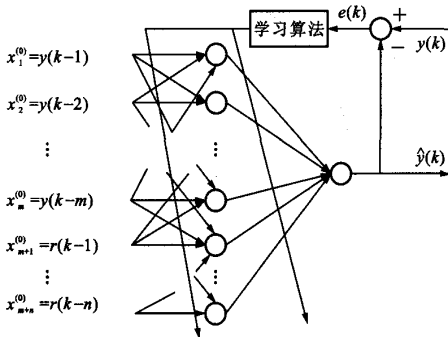


图3 神经网络辨识器结构

Fig.3 Identification structure of neural network

神经网络辨识器的数学描述如下,输入层为

$$O_i^0(k) = \begin{cases} y(k-i) & (0 \leq i \leq m) \\ r(k-i+m) & (m+1 \leq i \leq m+n) \end{cases}$$

隐层为

$$N_i(k) = \sum_j w_{ij} O_j^0(k)$$

$$O_i^1(k) = f(N_i(k))$$

输出层为

$$\hat{y}(k+1) = \sum_i w_i O_i^1(k)$$

式中:\$w\_{ij}\$、\$w\_i\$ 为输入层与隐层权系数。激励函数为

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

辨识器性能指标为

$$J_p = \frac{1}{2} [y(k+1) - \hat{y}(k+1)]^2$$

式中:\$\hat{y}\$ 为系统的估计输出。

权系数学习规律为

$$\Delta w_i(k) = a [y(k+1) - \hat{y}(k+1)] O_i^1(k)$$

$$\Delta w_{ij}(k) = a [y(k+1) - \hat{y}(k+1)] \cdot a' N_i(k) w_{ij}(k) O_j^0(k)$$

式中:\$a\$ 为学习修正率,\$0 < a \leq 1\$。

2.3 神经网络控制器设计原理

神经网络控制器 \$NN\_2\$ 的结构与 \$NN\_1\$ 相似。其自适应参数为神经网络的权系数,经过适当的学习,以控制未知特性的对象及适应环境的变化。神经网络控制器与半主动空气悬架串联,以给定的期望输出值与被控对象的实际输出之差来调节权系数。网络的输入量为车身振动加速度的均方根值,输出值 \$u\$ 是系统的控制量。

控制器的控制指标为

$$J_c = \frac{1}{2} [y^*(k+1) - \hat{y}(k+1)]^2$$

式中:\$y^\*\$ 为系统的期望输出。权系数学习规律为

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \Delta w_{ij}(k) \sum_{i=1}^R w_i f'(N_i(k)) w_{ij}(k)$$

3 计算机仿真与分析

取某奔驰车型为参考进行仿真研究,由于轮胎阻尼相对较小,忽略其对车辆的影响,悬架的参数见表1<sup>[10-11]</sup>。采用 Matlab/Simulink 对汽车悬架系统进行仿真。仿真过程中,取积分白噪声和正弦波两种典型路面作为模型的输入,模拟被动悬架和神经网络自适应控制悬架的系统响应。正弦波激励信号的频率 \$f\_0\$ 为 4 Hz,振幅 \$A\$ 为 10 mm。图4为在积分白噪声路面时,被动悬架和神经网络控制悬架的车身加速度、悬架动挠度和车轮动载荷的动态响应,表2为两种典型路面激励下仿真结果的均方根值。

表1 悬架参数

Tab.1 Suspension parameters

簧下质量 \$m_1\$/kg	簧上质量 \$m_2\$/kg	轮胎刚度 \$k_1\$/ (kN·m <sup>-1</sup> )	悬架基值刚度 \$k_0\$/(kN·m <sup>-1</sup> )	悬架阻尼 \$c\$/ (kN·s·m <sup>-1</sup> )
25	330	170	13	1

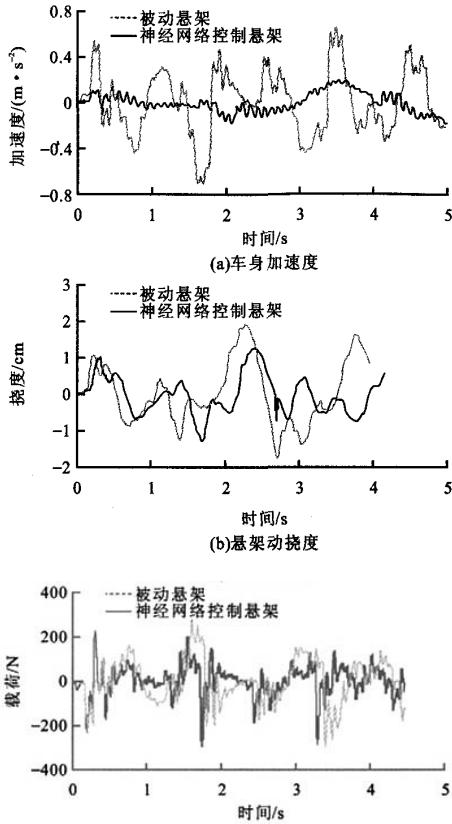


图 4 悬架系统的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of suspension system

表 2 仿真结果的均方根值

Tab. 2 Mean square roots of simulation result

悬架类型	车身加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )		车轮动载荷/ N		悬架动挠度/ mm	
	白噪声	正弦波	白噪声	正弦波	白噪声	正弦波
被动悬架	0.282 9	1.899 2	102.213 4	621.805 7	8.7	23.2
神经网络控制悬架	0.088 3	0.283 9	70.309 6	525.168 5	5.4	18.1

由仿真结果可以看出:在两种路面下,神经网络自适应控制半主动悬架能够大幅度降低车身垂直加速度,车辆的平顺性显著改善,白噪声路面激励下,神经网络控制悬架的车身垂直加速度均方根值比被动悬架降低 69%,在正弦路面激励下降低 85%;同时减小了悬架动挠度和车轮动载荷,使车辆的操纵稳定性和行驶安全性得到了改善,其中车轮动载荷分别降低 31%和 16%,悬架动挠度分别降低 38%和 22%。

### 4 实验分析

振动实验在自行研制的车辆空气悬架动态特性综合试验台上进行。在实验过程中,由机械式激振

器产生频率为 0~20 Hz,振幅为 10 mm 的正弦激励信号作为模拟路面,考虑到人体的敏感振动频率在 4~8 Hz 之间,实验中选取 4、6、8 Hz 3 种正弦激励路面。图 5 为 3 种不同频率下的被动悬架和神经网络自适应控制悬架的车身加速度动态响应,车身加速度均方根值对比见表 3。

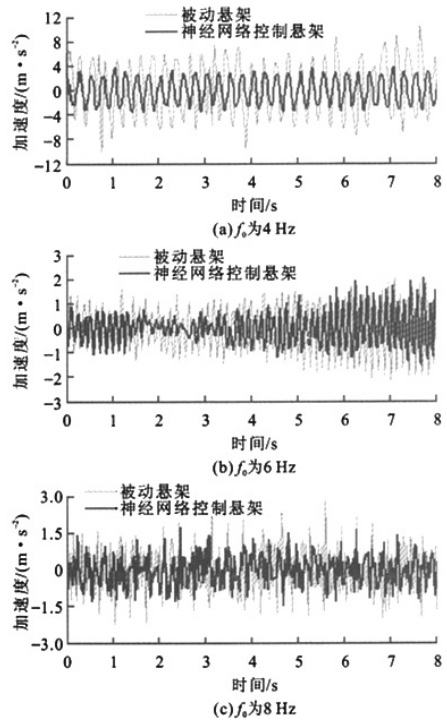


图 5 车身加速度对比

Fig. 5 Comparison of body accelerations

表 3 车身加速度均方根值

Tab. 3 Mean square roots of body accelerations  $m \cdot s^{-2}$

悬架类型	正弦波激励频率 $f_0$ /Hz		
	4	6	8
被动悬架	4.652 7	1.124 3	1.059 4
神经网络控制悬架	2.252 6	0.810 0	0.706 8

由实验结果可以看出:在 4 Hz 的正弦路面激励下,神经网络自适应控制半主动悬架的车身加速度比被动悬架下降 52%;当激振频率为 6 Hz 时,神经网络自适应控制半主动悬架的车身加速度比被动悬架下降 28%;当激振频率为 8 Hz 时,神经网络自适应控制半主动悬架的车身加速度比被动悬架下降 33%。

### 5 结 语

(1)本文以 2 自由度 1/4 车体模型进行研究,建立了半主动空气悬架系统的数学模型,并推导出其

控制方程。

(2)仿真分析表明神经网络控制器可以显著改善车身垂直加速度与车辆的平顺性,同时减小了悬架动挠度和车轮动载荷,使车辆的操纵稳定性和行驶安全性得到了改善<sup>[12-15]</sup>。

(3)实验研究验证了仿真结论,车辆半主动悬架系统可以采用神经网络自适应方法进行控制,并能同时兼顾车辆的平顺性和安全性,使半主动悬架获得良好的综合性能。

### 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 宋 宇,陈无畏,黄森仁. 车辆悬架多刚体动力学分析及 PID 控制研究[J]. 农业机械学报,2004,35(1):4-7.  
Song Yu, Chen Wu-wei, Huang Sen-ren. Multi-body dynamic analysis of vehicle suspension and PID control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 4-7. (in Chinese)
- [2] 余 强,马 建. 半被动悬架系统对汽车侧翻稳定性的改善[J]. 交通运输工程学报,2005,5(1):53-56.  
Yu Qiang, Ma Jian. Stability improvement of vehicle's anti-overturn with semi-active suspension system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 53-56. (in Chinese)
- [3] Youn I, Hac A. Semi-active suspension with adaptive capability[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 180(3): 475-492.
- [4] 郑 玲,邓兆祥,李以农. 汽车半主动悬架的模型参考自适应控制[J]. 中国公路学报,2005,18(2):99-102.  
Zheng Ling, Deng Zhao-xiang, Li Yi-nong. Model reference adaptive control of semi-active suspensions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 99-102. (in Chinese)
- [5] 李以农,郑 玲. 基于磁流变减振器的汽车半主动悬架非线性控制方法[J]. 机械工程学报,2005,41(5):31-37.  
Li Yi-nong, Zheng Ling. Nonlinear control methods of automotive semi-active suspension based on the MR damper[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 31-37. (in Chinese)
- [6] Zhao He-ping, Huang Hong-cheng, Xi Gang, et al. Dynamic characteristics of vehicle suspension with nonlinear springs [J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(2): 165-167.
- [7] 陈 龙,江浩斌,周孔亢,等. 半主动悬架系统设计及控制[J]. 机械工程学报,2005,41(5):137-141.  
Chen Long, Jiang Hao-bin, Zhou Kong-kang, et al. Control and design for semi-active suspension[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 137-141. (in Chinese)
- [8] 陈无畏,王其东,王志君,等. 汽车半主动悬架的非线性神经网络自适应控制研究[J]. 机械工程学报,2000,36(1):75-78.  
Chen Wu-wei, Wang Qi-dong, Wang Zhi-jun, et al. Research on adaptive control for automotive semi-active suspensions based on nonlinear neural network [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(1): 75-78. (in Chinese)
- [9] 杨波涛,王庆丰,夏仲凯. 液压半主动悬架的自适应神经网络控制[J]. 中国公路学报,2003,16(1):104-107.  
Yang Bo-tao, Wang Qing-feng, Xia Zhong-kai. Neural network control for semi-active hydraulic suspension[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 104-107. (in Chinese)
- [10] 李以农,郑 玲. 基于微分几何理论的汽车半主动悬架非线性振动控制[J]. 中国公路学报,2005,18(1):109-112.  
Li Yi-nong, Zheng Ling. Nonlinear control of automotive semi-active suspensions based on differential geometry theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 109-112. (in Chinese)
- [11] 王 辉. 车辆半主动悬架神经网络自适应控制的研究[D]. 南京:南京农业大学,2004.
- [12] 夏永旭,裘军良,王永才. 神经网络在公路隧道支护设计中的应用[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):69-72.  
Xia Yong-xu, Qiu Jun-liang, Wang Yong-cai. Application of artificial neural network in highway tunnel's support design [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2): 69-72. (in Chinese)
- [13] 方子帆,邓兆祥,翁建生. 汽车磁流变半主动悬架的控制研究[J]. 中国公路学报,2006,19(2):106-110.  
Fang Zi-fan, Deng Zhao-xiang, Weng Jian-sheng. Study of control strategy of automobile magnetorheological semiactive suspension [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 106-110. (in Chinese)
- [14] 董小闵,余 森,廖昌荣,等. 汽车磁流变半主动悬架自适应模糊控制研究[J]. 中国公路学报,2006,19(2):111-115.  
Dong Xiao-min, Yu Miao, Liao Chang-rong, et al. Research on adaptive fuzzy logic control for automobile magnetorheological semiactive suspension [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 111-115. (in Chinese)
- [15] 张红彦,赵丁选,陈 宁,等. 基于遗传算法的工程车辆自动变速神经网络控制[J]. 中国公路学报,2006,19(1):117-121.  
Zhang Hong-yan, Zhao Ding-xuan, Chen Ning, et al. Neural network control of automatic shift for construction vehicle based on genetic algorithm [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 117-121. (in Chinese)