

基于主动悬架的模糊神经网络控制的研究

孙运全, 赵李凤, 项伟

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 传统的被动悬架由于阻尼参数不可任意选择和调节, 减振性能不好, 不能满足乘客的乘坐舒适性; 而主动悬架可通过改变减振器的阻尼特性而适应不同的道路和行驶状况, 改善乘坐舒适性和操纵稳定性; 以汽车主动悬架为研究对象, 建立了汽车二自由度 1/4 车体模型, 提出了一种汽车主动悬架模糊神经网络控制方法, 设计了模糊神经网络控制器; 以 B 级路面作为随机路面输入, 并利用 Matlab 进行仿真; 通过动态仿真对被动悬架和主动悬架的特性进行了对比, 仿真结果表明, 该模糊神经网络控制器对车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷都有很好的抑制。

关键词: 主动悬架; 模糊神经网络; MATLAB 仿真; 舒适性

Active Suspension Based on Fuzzy Neural Network Control

Sun Yunquan, Zhao Lifeng, Xiang Wei

(School of Electrical and Information Engineering, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The traditional passive suspension damping can not be arbitrarily selected and adjusted, the damping performance is not good. It can not meet passenger comfort. Active suspension by changing the damping characteristics of the shock absorbers adapt to different road and driving conditions, it will improve the ride comfort and steering stability. We study active suspension and establish a model of two-degree-of-freedom quarter vehicle. A new way of fuzzy neural network control of automobile active suspension is presented, and a fuzzy neural network controller is designed. Grade B road as a random road input, and use Matlab simulation. The result shows that the fuzzy neural network controller reduces body acceleration, suspension stroke and tire deflection.

Key words: active suspension; fuzzy neural network; MATLAB; comfort

0 引言

悬架是汽车的重要组成部分之一, 它对汽车行驶的平顺性和操纵的稳定性等多种使用性能有着很大的影响^[1]。汽车悬架安装在车桥和车轮之间, 用来吸收汽车在高低不平的路面上行驶所产生的颠簸力。根据悬架系统的工作原理不同, 汽车悬架可分为被动悬架、半主动悬架和主动悬架 3 种^[2]。传统的被动悬架属于机械式悬架, 由于阻尼参数不可任意选择和调节, 减振性能不好。主动悬架具有自振频率低、弹簧刚度可调、振动及噪声小、车身高度可调、使用寿命长等优点, 因此具有广泛的应用前景^[3]。

神经网络控制技术是 20 世纪末迅速发展起来的一种智能控制方法。20 世纪 90 年代末, 人们开始将神经网络、模糊控制和模糊神经网络应用到汽车悬架的主动控制中, 并取得较好的控制效果^[4]。陈无畏等人将神经网络与自适应控制相结合, 并有效地用于汽车半主动悬架控制上, 证明半主动悬架的减振效果优于被动悬架^[5]。方锡邦等人将模糊控制技术运用在汽车半主动悬架控制中, 并取得较好的控制效果^[6]。容一鸣等对汽车半主动悬架采用神经网络控制及仿真, 以达到改善汽车行驶平顺性和操纵稳定性的目的^[7]。本文将模糊和神经网络相结合, 提出了一种神经网络自适应模糊控制的方法, 用来调整

汽车半主动悬架可调阻尼器的阻尼值, 从而通过改变阻尼力来达到改善悬架的稳定性和乘坐舒适性。

1 悬架的模型

本文以主动悬架为例, 对最具有代表性的二自由度 1/4 车体模型进行研究, 它忽略了车辆的横向振动和前后的俯仰振动, 只考虑车辆垂直方向的振动, 这种分析方法简单, 既保留了许多最主要的特性, 又避免了整车研究的复杂性。图 1 是 1/4 车体悬架模型基本结构。

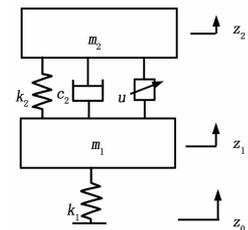


图 1 1/4 车体悬架模型

m_2 为簧上质量, m_1 为簧下质量, k_2 为悬架系统刚度, k_1 为轮胎刚度, c_2 为悬架阻尼, z_1 为簧下质量位移, z_2 为簧上质量位移, z_0 为路面输入, u 为主动控制力。

根据牛顿定理和图 1 的结构框图, 可以得到如下的微分方程

$$m_1 \ddot{z}_1 - c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2 (z_2 - z_1) + k_1 (z_1 - z_0) + u = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2 (z_2 - z_1) - u = 0 \quad (2)$$

令 $x_1 = z_1, x_2 = z_2, x_3 = \dot{z}_1, x_4 = \dot{z}_2$, 则系统的状态方程可表示为 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{U}$, 式中状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, 输入变量为 $\mathbf{U} = [z_0, u]^T$,

收稿日期: 2013-11-26; 修回日期: 2014-01-06。

基金项目: 第 49 批中国博士后科学基金(20110491358); 江苏省道路运输工具新技术应用重点实验室项目(1721490006)。

作者简介: 孙运全(1969-), 男, 江苏镇江人, 教授, 主要从事汽车与电力电子方向的研究。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{1}{m_1} \\ 0 & -\frac{1}{m_2} \end{bmatrix}$$

车辆主动悬架系统输出方程为： $Y = CX + DU$ ，式中输出变量

$$Y = [k_1(z_0 - z_1), \ddot{x}_2, x_1 - x_2]^T$$

$$C = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2 路面输入

本文所需要的路面干扰仿真的随机轮廓是利用白噪声经积分的方法产生的。为了研究主动悬架在时域内的特性，需要我们将路面不平度进行一定的变换，从频域变换时域，方便我们仿真及应用。那么此时的速度时域功率谱就是个常数为 $(2\pi)^2 G_q(n_0) n_0^2 v$ 的“白噪声”信号。路面轮廓可由功率谱密度的白噪声通过积分器产生，即：

$$z_0(t) = l_0 \int_0^t w(t) dt \quad (3)$$

式中， $w(t)$ 为单位白噪声， $l_0 = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) v}$

本文中取几何平均值 $G_q(n_0) = 256 * 10^{-6} m^2/m^{-1}$ ，空间频率 $n_0 = 0.1 m^{-1}$ ，车速 $v = 20 km/h$ 。

3 模糊神经网络控制器设计

3.1 悬架系统的性能指标

不论主动还是半主动悬架系统，评价它性能的好坏，要求它能动态地改变阻尼力，尽可能地削弱通过悬架传递到车体上的路面信号的大小。在本文中，我们要用合适的模糊神经网络控制器，使半主动悬架的输出响应 y 尽量接近 y_d 。

根据汽车整车性能对悬架的要求，通常用以下 3 个参数来评价悬架的优劣，即：

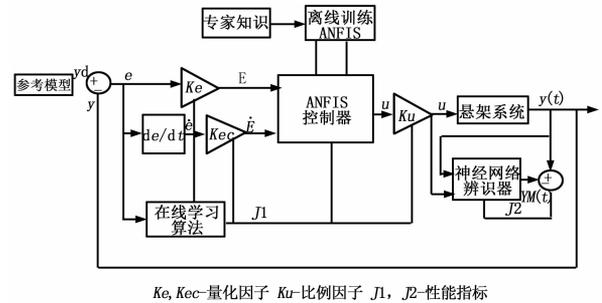
- (1) 车身垂直加速度（舒适性及行驶平顺性）， \ddot{z}_2 。
- (2) 车轮相对动载荷（安全性）， $k_1(z_1 - z_0)$ 。
- (3) 悬架弹簧动行程，即悬架动挠度， $z_2 - z_1$ 。

3.2 模糊神经网络控制系统

采用模糊控制器结构中最常用的二维模糊控制结构，两个输入变量，一个输出变量。考虑到测试的可实现性，参考输入选取理想的簧载质量加速度 \ddot{z}_{20} ，测试的变量选簧载质量加速度响应值 \ddot{z}_2 。误差 $e = \ddot{z}_2 - \ddot{z}_{20}$ 及误差的变化率 $\dot{e} = [e(t+1)$

$-e(t)]/\Delta t$ 为模糊控制器的两个输入变量，输出量为 U ，用来调整主动悬架可调阻尼器的阻尼值，从而通过改变减振器阻尼力来达到改善悬架振动特性的目的。

计算机通过模糊控制算法进行模糊控制时，每次采样得到的被控制量需计算机计算，得到模糊控制器的输入变量（误差 e 及误差变化 ec ）。为了进行模糊化处理，必须将输入变量从基本论域转换到相应的模糊集论域，从而引出量化因子 k_e 和 k_{ec} 。而经模糊控制算法给出的控制量 u （精确量）还不能直接控制对象，必须将其转换为控制对象能接受的基本论域中去，所以又引出了控制量的比例因子 ku 。



Ke, Kec-量化因子 Ku-比例因子 J1, J2-性能指标

图 2 FNNC 系统

3.3 模糊神经网络控制器设计

模糊神经网络控制器的结构如图 3 所示，该网络有 4 层，在连接结构中融入了隶属函数、模糊规则、模糊化、清晰化的功能，能够自动地调节隶属函数和模糊控制规则参数。控制器的输入经过变换函数 $x_1 = (1 - \exp(-ae)) / (1 + \exp(-ae))$ 和 $x_2 = (1 - \exp(-ade)) / (1 + \exp(-ade))$ 变换，其值被限制在 $[-1, 1]$ 区间。各层结点的输入输出关系如下：

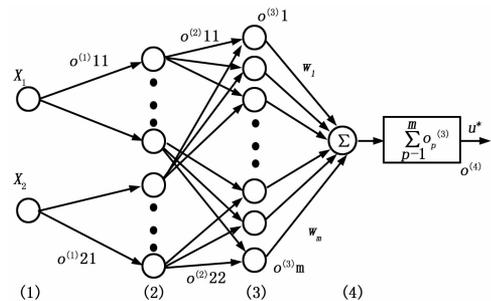


图 3 模糊神经网络控制器结构

(1) 第一层（输入层）：该层将变换后的误差及误差变化率输入网络

输入： $I_i^{(1)} = x_i, i=1, 2$

输出： $o_{ij}^{(1)} = I_i^{(1)}, i=1, 2; j=1, 2, \dots, n; n$ 是误差和误差变化率的模糊子集的个数。

(2) 第二层（语言变量层）：该层结点接受输入层信号并用高斯函数作为隶属函数来划分输入信号的分布。

输入： $I_{ij}^{(2)} = -\frac{(o_{ij}^{(1)} - a_{ij})}{b_{ij}^2}, i=1, 2; j=1, 2, \dots, n。$

输出： $o_{ij}^{(2)} = \mu_{A_{ij}} = \exp(I_{ij}^{(2)}), i=1, 2; j=1, 2, \dots, n。$ 式中， a_{ij} 与 b_{ij} 分别为高斯函数的中心值及宽度值参数。

(3) 第三层（模糊规则层）：该层的每个结点代表 1 条规则。

输入: $I_{(j-1)n+l}^{(3)} = o_{1j}^{(2)} o_{2l}^{(2)}, j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n.$

输出: $o_i^{(3)} = \mu_i = I_i^{(3)}, i = 1, 2, \dots, m (= n^2)$

(4) 第四层 (输出层): 所有规则层结点均与该层结点连接, 完成解模糊, 每个连接权代表规则输出隶属函数的中心值。

输入: $I^{(4)} = \sum_{p=1}^m o_p^{(3)} W_p, W_p$ 为输出层连接权值。

输出: $o^{(4)} = u^* = \frac{I^{(4)}}{\sum_{p=1}^m o_p^{(3)}}$

4 仿真与试验结果分析

本节根据前文的悬架模型和路面随机输入, 利用 Matlab+Simulink 进行仿真分析。参照文献 [8], 选取 GTX 轿车 1/4 车型的模型参数 $m_1 = 116.4 \text{ kg}, m_2 = 559.4 \text{ kg}, k_1 = 604\,990 \text{ N/m}, k_2 = 33\,000 \text{ N/m}, c_2 = 2\,200 \text{ N/m}$, 图 4, 图 5, 图 6 分别为在积分白噪声路面时, 被动悬架和模糊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。

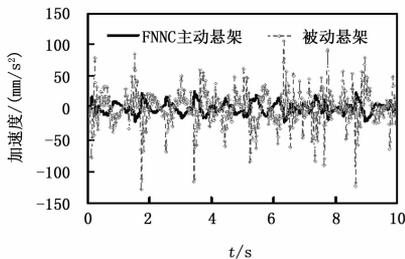


图 4 车身加速度

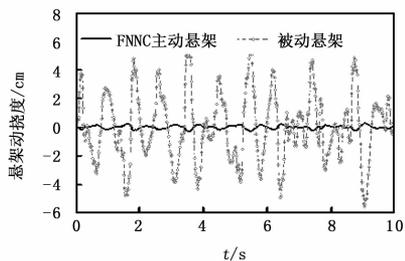


图 5 悬架动挠度

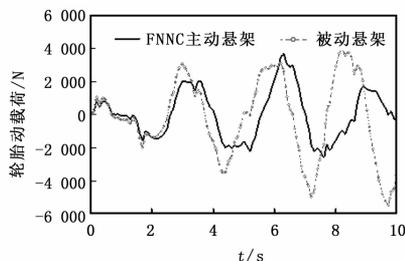


图 6 轮胎动载荷

由图 4~图 6 的仿真曲线可以看出, 在 B 级随机路面以 20 km/h 速度行驶的工况下, 被动悬架车身加速度大约在 $-1.25 \sim 1 \text{ m/s}^2$, 悬架动挠度大约在 $-0.06 \sim 0.06 \text{ m}$ 之间, 轮胎动载荷大约在 $-5\,000 \sim 4\,000 \text{ N}$ 之间; 模糊神经网络控制下的主动悬架的车身加速度大约在 $-0.25 \sim 0.25 \text{ m/s}^2$, 悬架动挠度大约在 $-0.01 \sim 0.01 \text{ m}$ 之间, 轮胎动载荷大约在 $-2\,000 \sim 3\,800 \text{ N}$ 之间。经过模糊神经网络控制后, 车身加速度和悬架动挠度都有明显的减小, 对于车辆的平顺性、乘坐舒适性有较大的改善。轮胎动载荷在经过模糊神经网络控制后也有了较小的减小, 意味着轮胎接地性有了一定的提高。一般来说, 通过控制策略不太可能使车身加速度、悬架动挠度、轮胎动载荷三者同时朝较小趋势减小, 只能保证一项或两项指标能够改善。本文所设计的模糊神经网络控制器都能改善车辆的平顺性与乘坐舒适性, 使主动悬架具有良好的综合性能。

5 结论

- (1) 本文以 2 自由度 1/4 车体模型进行研究, 建立了主动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, 同时减少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。
- (3) 试验研究验证了仿真结论, 车辆半主动悬架系统可以采用自适应模糊神经网络控制方法进行控制, 并能同时兼顾车辆的平顺性和安全性, 使主动悬架获得良好的综合性能。

参考文献:

[1] 陈家瑞. 汽车构造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[2] 夏爽. 基于四分之一悬架模型与整车虚拟样机的主动悬架控制系统仿真研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[3] 于显利. 车辆主动悬架集成控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.

[4] 贝绍铁, 赵景波, 张兰春, 等. 车辆主动悬架系统模糊神经网络控制研 [J]. 系统仿真学报, 2012, (12): 2952-3007.

[5] 陈无畏, 等. 汽车半主动悬架的神经网络自适应控制 [J]. 汽车工程, 1998, (1): 31-36.

[6] 方锡邦、陈无畏, 等. 模糊控制技术及其在汽车半主动悬架中的应用 [J]. 机械工程学报, 1999, 35 (3): 98-100.

[7] 容一鸣, 阳杰, 崔九同. 汽车半主动悬架的神经网络控制及仿真 [J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2003, 25 (1): 65-67.

[8] 吕金龙. 车辆半主动悬架路面激励下的仿真研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.

[9] 田晋跃, 李光, 田刚. 组合式半挂车液压悬架线性二次型最优控制器的设计与仿真 [J]. 机械设计与制造, 2012, (9): 963-965.

[10] 管继富, 武云鹏, 等. 基于统计优化的车辆半主动悬架自适应控制 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (2): 188-190.

(上接第 1414 页)

[7] 李国勇. 最优控制理论及参数优化 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[8] Derong L. Action-dependent adaptive critic designs [A]. Neural

Networks, 2001. Proceedings. IJCNN '01. International Joint Conference on [C], Washington, 2001: 990-995.

[9] 罗及红. 基于 PID 算法的炉窑温度串级控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, (12): 3243-3245.