

基于模糊神经 PID 控制的汽车主动 悬架平顺性分析与测试

田丰福, 杨金玉

(长春汽车工业高等专科学校, 第一汽车集团公司教育培训中心, 长春 130013)



摘要:路面的激励作用会使车辆在行驶过程中产生颠簸和振动,严重影响汽车行驶平顺性和乘坐舒适性。建立了 1/4 汽车主动悬架数学模型,提出一种基于模糊神经网络的控制策略。该方法利用了模糊控制鲁棒性强和神经网络控制收敛速度快的特点,对系统参数进行实时在线调整;同时,以悬架动行程、车轮动载荷以及车身垂直加速度为衡量指标进行仿真分析和测试研究。结果表明,所提出的控制策略可以有效减小汽车在行驶中因路面激励作用而产生的振动,大幅改善了车辆操纵稳定性、汽车行驶平顺性及乘坐舒适性,鲁棒性强,有一定可借鉴意义。

关键词:主动悬架;模糊神经控制;PID 控制;测试

中图分类号:U 461.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7167(2017)05-0044-04

Analysis and Test of Ride Comfort of Vehicle Active Suspension Based on Fuzzy Neural PID Control

TIAN Fengfu, YANG Jinyu

(Changchun Automobile Industry Institute, China First Automobile Group Corporation, Changchun 130013, China)

Abstract: The excitation of road surface causes the vehicle to produce bump and vibration in the traveling process, affects the automobile ride comfort. This study established a 1/4 car active suspension model, proposed a control strategy based on fuzzy neural network. The design made full use of strong robustness of fuzzy control and fast convergence of neural network, could real-time adjust system parameters. Tests and simulation analyses of suspension dynamic travel, wheel dynamic changes in load, and the vertical acceleration of the body research were carried out. The results show that the proposed control strategy can effectively reduce the vibration caused by road excitation and produce, improve vehicle handling stability, ride comfort, strong robust, has certain reference significance.

Key words: active suspension; fuzzy neural control; PID control; tests

0 引言

悬架不仅在车轮和车体之间传递力矩,还起着缓冲路面激励的作用,其性能直接决定着车辆的行驶平顺性和乘坐舒适性。由于被动悬架的弹簧刚度和阻尼

系数是固定不变的,在汽车行驶过程中无法自动调节,只有在特定工况才能达到最优的工作状态,使汽车的动态性能受到影响。主动悬架采用力发生器取代被动悬架阻尼元件,可以根据路面的激励作用对控制力进行调节,从而得到最优的控制效果^[1-2]。目前对主动悬架系统的研究,研究人员提出了各种不同的控制方法,如柴陵江等^[3]建立 7 自由度主动悬架的动力学模型,设计出主动悬架 LQG 控制器,并采用层次分析法确定各评价指标的加权系数,降低了车身振动幅度,提高乘坐舒适性。赵强等^[4]针对主动悬架模糊 PID 控制器

收稿日期:2016-09-19

基金项目:吉林省科技发展计划项目(201303040NY)

作者简介:田丰福(1983-),男,内蒙古兴安盟人,讲师,现主要从事汽车维修与电子技术研究。

Tel.:13644304021; E-mail:yangjinyu-yjy@163.com

参数的最优选取问题,利用遗传算法的全局优化能力和并行能力对PID参数进行优化。王振臣等^[5]利用人工蜂群算法在线优化PID参数增益,并与神经网络控制相结合,提高了主动悬架的减振效果,且有较强的鲁棒性。

悬架是一个多变量、时变性的系统,用简化的数学模型不能真实反映出实际控制情况。本研究尝试将神经网络与模糊推理技术相结合应用于主动悬架系统控制,对PID控制器参数进行实时调整,实现悬架的最优控制。同时,采用仿真分析和现场测试对轮胎动载荷、车身垂直加速度、悬架动行程3个控制指标进行性能评定,从而验证不同路面激励条件下,所提出控制策略的可靠性。

1 主动悬架动力学分析

主动悬架由作动器、阻尼和弹簧组成,能够根据路面激励自动调节悬架系统的参数,使系统始终在最优的状态下工作。其工作原理是将传感器采集到的路面信息传送给计算机,处理器根据输入信息的变化对作动器发出相应的控制信号,后者产生用于抵消路面激励的控制力,减小车身振动幅度,实现汽车平顺性与舒适性的最佳组合,克服了被动悬架因参数固定不变而造成的舒适性差问题,主动悬架结构如图1所示^[6-7]。

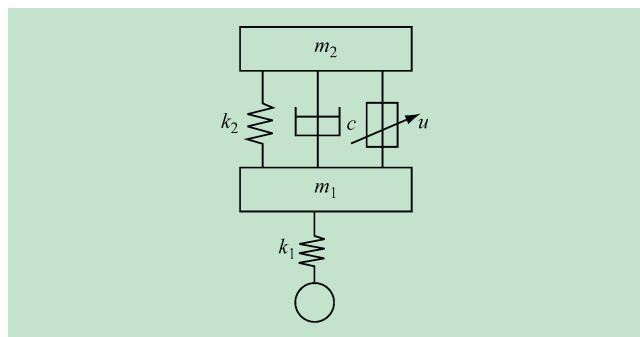


图1 主动悬架结构模型

目前汽车悬架系统的建模方式主要包括1/4车、1/2车以及整车3种^[8-9]。1/4车模型多用于研究悬架系统控制策略问题;1/2车模型多用于研究不同悬架系统之间参数匹配问题;整车模型多用于研究车辆的整体运动姿态问题。以1/4车悬架作为研究对象,对其进行运动学分析。假设车体是刚性的,则悬架动力学微分方程组为^[10]:

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{y}_2 &= -k_2(y_1 - y_2) - c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + u \\ m_1 \ddot{y}_1 &= k_2(y_2 - y_1) + c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - u + k_1(s - y_1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m_1, m_2 分别为车轮与车体的质量; k_1, k_2 为轮胎与悬架的刚度; y_1, y_2 为车轮和车体在垂直方向上的位移; s 为路面激励; u 为作动器产生的控制力; c 为减震器的阻尼系数。

取状态变量 $x_1 = y_1, x_2 = y_2, x_3 = \dot{y}_1, x_4 = \dot{y}_2$, 令 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$, 则输入变量为:

$$\mathbf{U} = (u, s)^T$$

将模型改写成状态空间形式,即:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{m_2} & \frac{c}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & 0 \\ \frac{c}{m_1} & -\frac{c}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_2} & 0 \\ -\frac{1}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{m_2} & \frac{c}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2 基于模糊神经网络的主动悬架控制策略

主动悬架是一个非常复杂的系统,难以建立精确的数学模型。要想获得最优的控制效果,需要实时调整参数,以抵消干扰引起的控制偏差。为此,基于模糊神经网络设计了参数自学习PID控制器,如图2所示^[11-12]。通过模糊规则计算神经网络的权重系数,实现对传统PID控制器参数的实时在线调整,从而满足不同工况条件下的需要。

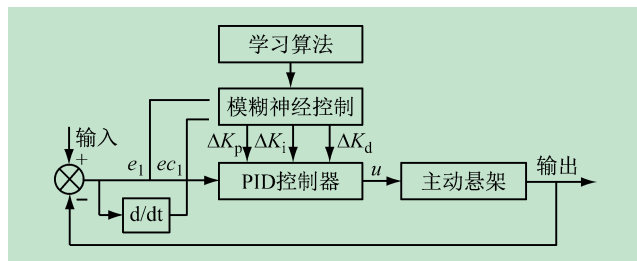


图2 模糊神经PID控制器结构

本文研究的模糊神经网络模型的拓扑结构包含五层,有2个输入节点和3个输出节点,如图3所示^[13-14]。输入节点分别对应输出变量的偏差 e 以及偏

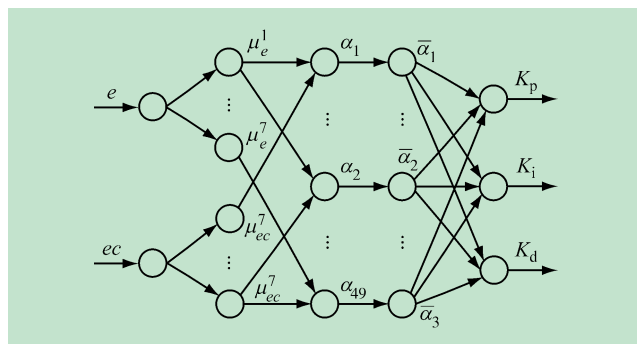


图3 模糊神经网络的拓扑结构

差变化率 ec , 处理后得到的参数通过输出节点分别对应 PID 控制器的 3 个参数。

第 1 层为输入层。2 个节点分别对应输入变量, 与变换后的误差及误差变化率相连接, 不作任何计算直接输送给下一层。

第 2 层是语言变量层。每个节点对应一个语言变量值, 功能是将输入量转换为模糊矢量, 作为控制器的输入, 取隶属度函数为:

$$\mu_i^j = \exp[-(x_i - c_{ij})^2] / \sigma_{ij}^2 \quad (3)$$

式中: c_{ij} 为隶属函数的中心; σ_{ij}^2 为隶属函数的宽度。

第 3 层是模糊推理层。每个节点代表一条模糊规则, 通过与模糊化层的连接来完成模糊规则的匹配, 通过各相应的权重系数, 计算每条规则的适用度 α_j 。

第 4 层是归一层, 用来进行各条规则适用度的归一化计算。

第 5 层是输出层, 将模糊化后的变量清晰化, 与 PID 控制器的 3 个参数相对应。

可见, 所设计的模糊神经网络结构实质上是一种多层前馈网络, 可以用误差反传的方法来设计调整参数的学习算法, 表达式为:

$$e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (r_i - y_i)^2 \quad (4)$$

式中: r_i 为目标输出; y_i 为实际输出。

网络连接权值的学习规则为:

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) + \eta(r_i + y_i) + \lambda[\omega_{ij}(k) - \omega_{ij}(k-1)] \quad (5)$$

式中: η 为学习速率; λ 为平滑因子, 且 $0 < \lambda < 1$ 。

3 仿真分析

路面激励是引起车辆颠簸振动的最主要因素, 通常采用路面不平度来表示不同等级的路面, 其表达式为^[15]:

$$\dot{Z}_r(t) = -2\pi f_0 Z_r(t) + 2\pi \sqrt{G_0 v} w(t) \quad (6)$$

式中: f_0 为下截止频率; G_0 为路面不平度系数; $w(t)$ 为高斯白噪声; v 为汽车时速。

为模拟路面激励, 在 Matlab 仿真平台中建立路面白噪声模型, 得到 B 级路面激励曲线, 如图 4 所示。

为验证模糊神经 PID 控制策略的可靠性, 基于 Matlab/Simulink 平台进行仿真分析, 选取轮胎的刚度 155 kN/m, 悬架的刚度 16 kN/m, 车轮质量 48 kg, 车体质量 320 kg, 汽车行驶速度 10 m/s, 减震器的阻尼系数 1.4 kN·s/m。分别对车身垂直加速度、悬架动行程以及轮胎动载荷 3 个性能指标进行分析, 并与传统 PID 控制进行比较, 如图 5 所示。

从仿真结果看, 与传统 PID 控制策略相比, 模糊神经 PID 控制可以大大提高主动悬架的动态特性, 减小路面激励对车辆的影响, 缩小振动和颠簸的幅度, 控制

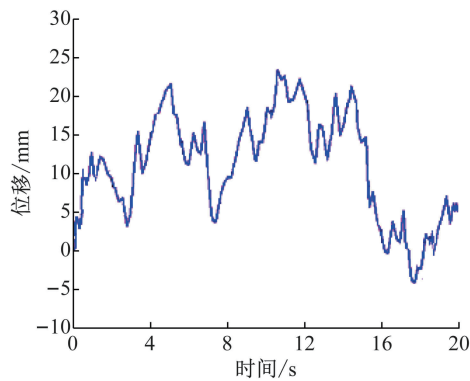
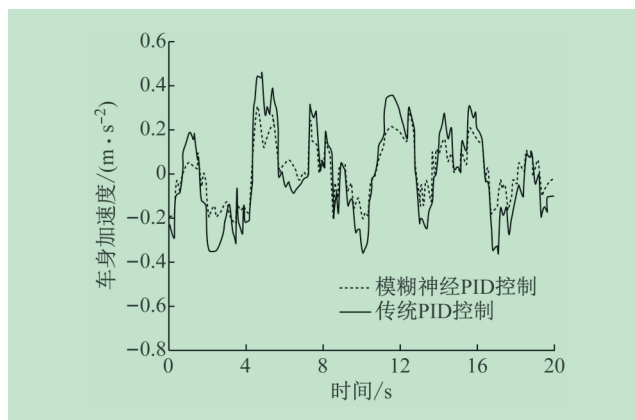
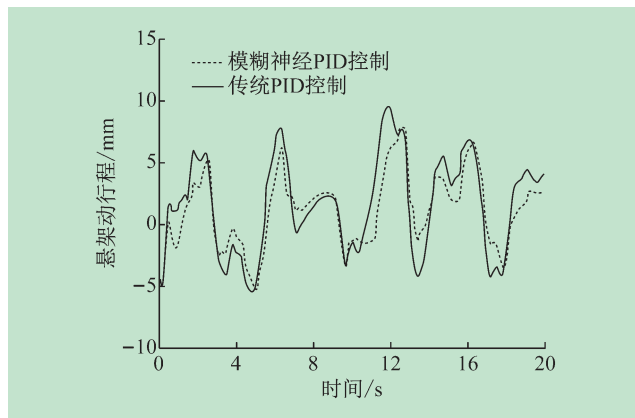


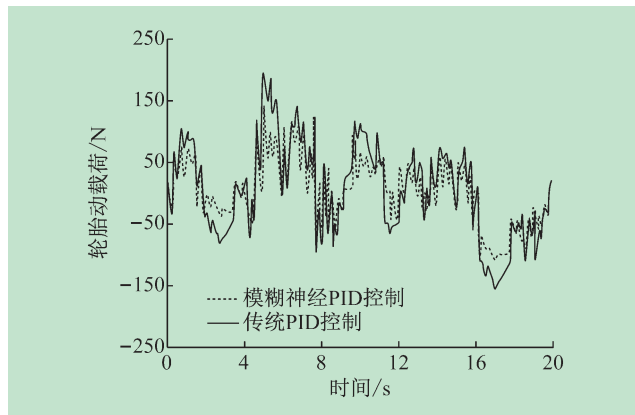
图4 B级路面模拟曲线



(a) 车身垂直加速度



(b) 悬架动行程



(c) 轮胎动载荷

图5 仿真曲线

效果好,鲁棒性强。

4 性能测试

为验证控制策略的有效性,采用模糊神经PID控制器对实车进行悬架性能测试。选取坡度 $<2\%$ 的水泥路面作为试验场地,符合B级路面条件。测试工况1:汽车在所选路面以25 km/h的时速行驶。测试工况2:汽车以相同时速驶过10 cm高的凸块。根据测试条件,取车身垂直加速度作为测试指标,结果如图6所示。

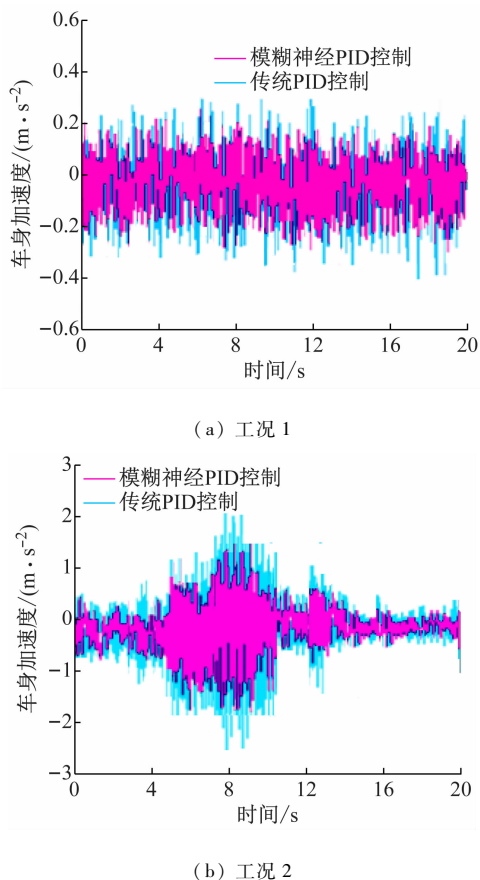


图6 测试结果

测试结果表明,与传统PID控制相比,采用模糊神经PID控制的主动悬架在各测试工况下车身垂直加速度的幅值明显减小,说明该控制方法可大幅提高主动悬架的动态性能,测试结果同时也验证了仿真分析的正确性。

5 结 语

针对被动悬架存在的问题,为提高汽车行驶平顺性、操纵稳定性以及乘坐舒适性,对1/4车主动悬架的控制策略展开研究。首先建立了主动悬架动力学方程,找出影响汽车动态特性的因素。提出模糊神经

PID控制策略,实时在线整定主动悬架的参数,使系统始终保持在最优的控制状态,使之适应实际路面环境的不断变化。最后,取轮胎动载荷、车身垂直加速度、悬架动行程作为评价指标进行仿真和测试。结果表明,应用模糊神经PID控制策略的主动悬架能有效克服路面激励,减小车体的振动幅度和速度,与传统控制算法相比,该策略响应速度快,抗干扰能力强,大大提高和改善了车辆行驶稳定性和乘坐舒适性。

参考文献 (References):

- [1] 周长城. 汽车平顺性与悬架系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] Eltantawie M A. Decentralized neuron-fuzzy control for half car with semi-active suspension system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(3): 423-431.
- [3] 柴陵江,孙涛,冯金芝,等. 基于层次分析法的主动悬架LQG控制器设计[J]. 汽车工程,2010,32(8):712-718.
- [4] 赵强,何法,王鑫,等. 基于遗传算法优化的车辆主动悬架模糊PID控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(2):6-11.
- [5] 王振臣,赵莎,杨康. 汽车主动悬架单神经元PID控制器设计[J]. 机械设计与制造,2013(11):29-32.
- [6] Liu Xiao-bin, Liu Xiao-jin. Design and simulation of active suspension system based on the LQG controller [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(2):33-36.
- [7] Yim S, Park Y, Yi K. Design of active suspension and electronic stability program for rollover prevention[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2): 147-153.
- [8] 邱权,郑玲. 自传感磁流变半主动悬架滑模观测及控制[J]. 汽车工程学报,2013,5(9):345-353.
- [9] Eltantawie M A. Decentralized neuro-fuzzy control for half car with semi-active suspension system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(3): 423-431.
- [10] Alyaqout S F, Papalambros P Y, Ulsoy A G. Combined design and robust control of a vehicle passive/active suspension [J]. International Journal of Vehicle Design, 2012, 59(4): 315-330.
- [11] 楼少敏,付振,许沧栗. 整车半主动悬架滑模控制器的设计与仿真[J]. 汽车工程, 2010,32(8):719-726.
- [12] Demir O, Keskin I, Cetin S. Modeling and control of a nonlinear half-vehicle suspension system: a hybrid fuzzy logic approach [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 67(3): 2139-2151.
- [13] 王东. 优化PID与神经PID控制主动悬架的性能对比研究[J]. 机械设计与制造, 2011(10):96-98.
- [14] 陈龙,黄晨. 基于悬架效用函数的车身姿态控制[J]. 农业机械学报,2011,42(8):15-25.
- [15] 楼少敏,付振,许沧栗. 基于滑模理论的主动悬架控制[J]. 汽车工程,2010,32(5):434-438.