

文章编号: 1674-8085(2019)04-0067-05

采用改进神经网络 PID 控制的车辆悬架 振动仿真研究

孙 亮

(池州职业技术学院机电系, 安徽, 池州 247000)

摘 要: 为了研究车辆悬架振动模型, 创建了车辆悬架平面简图, 并根据牛顿定律推导出车辆悬架振动微分方程式。引用 BP 神经网络 PID 控制器, 对传统粒子群算法进行改进, 将改进粒子群算法用于优化 BP 神经网络 PID 可知结构。通过 MATLAB 软件中对车辆悬架位移、速度和加速度进行仿真验证; 同时, 与 BP 神经网络 PID 控制器仿真结果进行比较和分析。结果表明, 车辆悬架采用 BP 神经网络 PID 控制器, 悬架行程、轮胎位移和车身加速度均方根值较大, 车辆整体振动幅度较大; 而采用改进 BP 神经网络 PID 控制器, 悬架行程、轮胎位移和车身加速度均方根值较小, 车辆整体振动幅度较小。采用改进神经网络 PID 控制车辆悬架, 能够抑制路面噪声激励对车辆振动幅度的影响, 提高车辆行驶的安全性。

关键词: 车辆悬架; 改进粒子群算法; BP 神经网络; PID 控制; 仿真

中图分类号: U463

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2019.04.013

RESEARCH ON VEHICLE SUSPENSION VIBRATION SIMULATION USING IMPROVED NEURAL NETWORK PID CONTROL

SUN Liang

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Chizhou Vocational and Technical College, Chizhou, Anhui 247000, China)

Abstract: In order to study the vibration model of vehicle suspension, the plane diagram of vehicle suspension was created, and the differential equation of vehicle suspension vibration was derived according to Newton's law. BP neural network PID controller was used to improve the traditional particle swarm optimization algorithm. The improved particle swarm optimization algorithm was used to optimize the BP neural network PID knowable structure. The displacement, speed and acceleration of vehicle suspension were simulated and verified by MATLAB software. At the same time, the simulation results of the BP neural network PID controller were compared and analyzed. The results showed that the average square root of suspension travel, tire displacement and body acceleration were larger and the overall vibration amplitude of vehicle is larger when the BP neural network PID controller was used for vehicle suspension, while the average square root of suspension travel, tire displacement and body acceleration were smaller when the improved BP neural network PID controller was used, and the overall vibration amplitude of vehicle was smaller. Using improved neural network PID to control vehicle suspension can restrain the influence of road noise excitation on vehicle vibration amplitude and improve vehicle driving safety.

Key words: vehicle suspension; improved particle swarm optimization algorithm; BP neural network; PID control; simulation

收稿日期: 2018-12-16; 修改日期: 2019-03-18

作者简介: 孙 亮(1983-), 男, 安徽池州人, 讲师, 硕士, 主要从事机械制造、机电一体化、控制工程等方面的研究(E-mail:sliang8391@sina.com).

0 引言

当车辆在路面上行驶过程中, 由于路面各种激励信号会通过轮胎传递给车辆悬架, 导致车辆发生振动现象, 从而影响到驾驶员乘坐的舒适性。传统车辆悬架减震器响应时间较长, 不能适应复杂路况, 有可能造成人员受伤。导致这一现象的主要原因还是车辆悬架装置控制不当。目前, 市场上大多车辆采用的是被动悬架, 被动悬架阻尼系数和刚度系数通常是固定的, 不能进行实时调整^[1]。主动悬架在被动悬架基础上增加了自适应调节控制系统, 可以通过主动控制实现多目标控制^[2]。

当前, 人们对车辆舒适度要求越来越高, 因此, 许多科研人员对车辆悬架系统进行了深入研究。例如: 文献[3]采用改进 PID 控制车辆悬架系统, 分析了车辆悬架系统参数, 引用传统 PID 控制器, 采用粒子群算法优化 PID 控制参数, 通过车辆振动仿真检验优化后的控制效果, 从而改善了车辆悬架性能。文献[4]采用 PID 控制汽车悬架系统, 创建主动悬架简图, 根据动力学定理建立振动数学模型, 设计主动悬架 PID 控制系统, 采用 MATLAB 软件对车辆振动评价指标参数进行仿真, 从而提高了车辆控制响应速度。文献[5]采用 RBF 神经网络控制车辆主动悬架系统, 建立了主动悬架系统模型, 在传统 PID 控制基础上, 设计了 RBF 神经网络 PID 控制器, 采用 MATLAB 软件 RBF 神经网络 PID 控制效果进行仿真验证, 从而降低了车辆振动幅度。以往研究的车辆主动悬架控制系统, 在一定程度上降低了车辆振动幅度, 但是受到路面激励信号干扰时, 振动幅度仍然较大。对此, 本文创建了 1/4 车辆 2 自由度的车辆悬架模型, 根据牛顿定律推导车辆悬架振动方程式, 引用 BP 神经网络 PID 控制车辆主动悬架, 采用改进粒子群算法优化 BP 神经网络 PID 控制器。通过数学软件 MATLAB 对车辆振动评价指标参数进行仿真, 与优化前形成对比和分析, 为深入研究车辆主动悬架控制系统提高参考依据。

1 车辆悬架模型

为了简化车辆悬架研究模型, 采用 1/4 车辆 2 自由度模型为研究对象, 如图 1 所示。

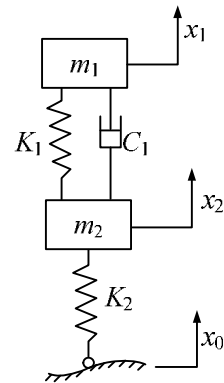


图 1 二自由度车辆被动悬架简图

Fig.1 A sketch of two-degree-of-freedom vehicle passive suspension

根据牛顿定律可知, 悬架振动方程式^[6-7]为:

$$m_1 x_1'' + C_1 (x_1' - x_2') = K_1 (x_2 - x_1) \quad (1)$$

$$m_2 x_2'' - C_1 (x_1' - x_2') = K_1 (x_1 - x_2) - K_2 (x_2 - x_0) \quad (2)$$

式中: m_1 为车身质量; m_2 为车轮质量; K_1 为悬架刚度; K_2 为轮胎刚度; C_1 为减震器阻尼系数; x_0 为路面噪声激励函数; x_1 为车身位移; x_2 为轮胎位移。

2 神经网络 PID 控制器

神经网络 PID 控制器采用增量式数字 PID 控制器和 BP 神经网络, 其控制结构如图 2 所示。

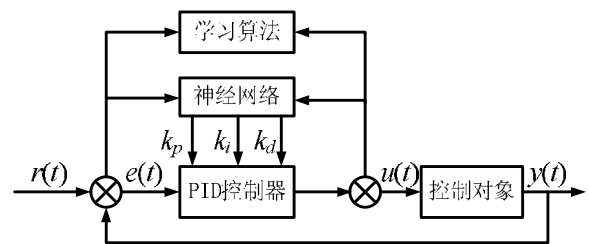


图 2 神经网络 PID 控制器

Fig.2 Neural network PID controller

PID 控制采用增量式, 其方程式^[8]为:

$$u(t) = u(t-1) + k_p [e(t) - e(t-1)] + k_i e(t) + k_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (3)$$

式中: k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_d 为微分系数; $e(t)$ 为误差。

神经网络采用三层 BP 结构, 如图 2 所示。

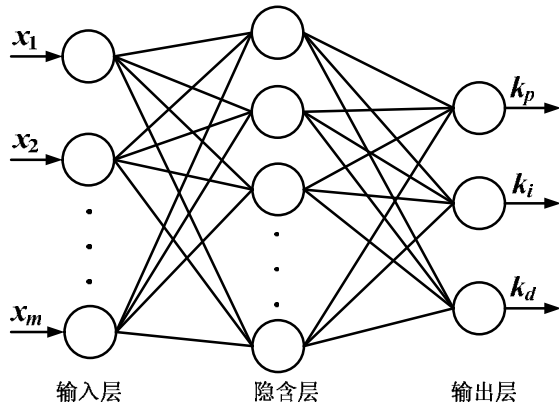


图 3 三层 BP 神经网络

Fig.3 Three-layer BP neural network

在图 3 中, 假设输入层节点有 m 个, 隐含层节点有 Q 个, 输出层有 3 个节点。

输入层网络结构^[9]为:

$$I_j^{(1)} = x(j) \quad (4)$$

隐含层输入和输出网络结构^[9]为:

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^M \omega_{ij}^{(2)} I_j^{(1)} \quad (5)$$

$$I_j^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)) \quad (6)$$

式中: $\omega_{ij}^{(2)}$ 为隐含层加权系数; (1)、(2)、(3) 分别表示输入层、隐含层和输出层。

隐含层采用双曲正切函数, 如下所示:

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (7)$$

输出层输入和输出网络结构^[9]为:

$$net_1^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^Q \omega_{i1}^{(3)} I_i^{(2)}(k) \quad (8)$$

$$I_1^{(3)}(k) = g(net_1^{(3)}(k)) \quad (9)$$

$$I_1^{(3)}(k) = k_p \quad (10)$$

$$I_2^{(3)}(k) = k_i \quad (11)$$

$$I_3^{(3)}(k) = k_d \quad (12)$$

增量式 PID 控制器调节参数 k_p 、 k_i 和 k_d 对应神经网络 3 个输出节点。输出层激活函数采用非负函数, 如下所示:

$$g(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (13)$$

控制器性能目标函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e(k)^2 \quad (14)$$

3 改进 BP 神经网络 PID 控制

3.1 改进粒子群算法

粒子群算法和模拟退火算法类似, 从随机解开始, 通过迭代更新搜索出全局最优解。粒子在迭代搜索过程中, 其速度和位置更新方程式^[10-11]为:

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (P_i - X_i^t) + c_2 r_2 (G - X_i^t) \quad (15)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (16)$$

式中: V_i^t 为粒子 i 迭代 t 次的速度; V_i^{t+1} 为粒子 i 迭代 $(t+1)$ 次的速度; c_1 和 c_2 为区间 $[0, 2]$ 的学习因子; r_1 和 r_2 为区间 $[0, 1]$ 的随机数; ω 为惯性权重系数; P_i 为粒子 i 个体最优位置; G 为种群中最优位置; X_i^t 为粒子 i 迭代 t 次的位置; X_i^{t+1} 为粒子 i 迭代 $(t+1)$ 次的位置。

为了提高粒子群算法优化能力, 对粒子群算法惯性权重系数和变异操作进行改进, 惯性权重系数改进公式为:

$$\omega = \frac{(\omega_0 - \omega_1)}{T} \cdot (T - t) + \omega_1 \quad (17)$$

式中: ω_0 为初始惯性权值; ω_1 为最终惯性权值; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数。

变异操作是对粒子位置更新后, 重新初始化更新粒子, 通过迭代搜索到全局最优值。粒子群算法加入变异操作, 全局最优值搜索能力更强, 自适应变异操作公式为:

$$A_{ij} = \begin{cases} A_{ij} + (A_{ij} - A_{\max}) f(t), & q \geq q_0 \\ A_{ij} + (A_{\min} - A_{ij}) f(t), & q < q_0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $A_{\max}$ 、 $A_{\min}$ 为粒子 A_{ij} 的上限和下限; r 为区间 $[0, 1]$ 的随机数; a 为可调参数。

3.2 改进神经网络 PID 控制优化

采用改进粒子群算法优化神经网络, 优化目标是适应度函数。改进粒子群算法搜索到全局最优位置时, 其适应度函数值最小。适应度函数选择车身加速度均方根值, 其计算公式为:

$$f = \sqrt{\frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} |x_1''|^2 dt} \quad (19)$$

适应度函数值越小,悬架振动幅度越小,控制效果越好。车辆振动采用改进粒子群算法优化 BP 神经网络控制流程如图 4 所示。具体控制过程如下:

- 1) 计算输出信号与输入信号误差;
- 2) 将误差反馈后,通过粒子群算法对神经网络初始权值进行训练;
- 3) 通过训练后获得最佳权值,通过优化后的神经网络在线调节 PID 控制参数,输出最优 PID 控制参数。

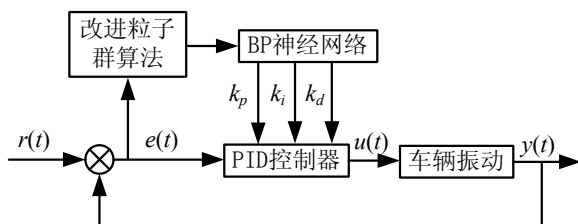


图 4 车辆振动控制优化流程

Fig.4 Optimized flow of vehicle vibration control

4 仿真及分析

为了对比不同控制器控制效果,假设路面为白噪声激励信号,其公式^[12]为:

$$x_0(t)' = -2\pi f_0 x_0(t) + 2\pi \sqrt{G_q(n_0)} v q(t) \quad (20)$$

式中: f_0 为振动频率; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数; v

为车辆行驶速度; $q(t)$ 为高斯白噪声。

为了验证改进粒子群算法优化 BP 神经网络 PID 控制效果,采用 MATLAB 软件对车辆振动进行仿真验证。车辆振动仿真参数设置为: $m_1=350$ kg, $m_2=45$ kg, $K_1=17000$ N/s, $K_2=200000$ N/s, $C_1=1500$ Ns/m, 振动频率 $f_0=0.1$ Hz, 初始种群数量为 30, 最大迭代次数为 100; 惯性权重系数为 $\omega_0=0.9$, $\omega_1=0.4$, 学习因子为 $c_1=c_2=2$, 随机数为 $r_1=r_2=0.5$, 神经网络学习速率为 0.25。假设车辆行驶速度为 30 m/s, 通过白噪声路面激励信号后, 车身加速度、悬架行程及轮胎位移仿真结果如图 5、图 6 及图 7 所示。

根据图 5 可得: 采用 BP 神经网络控制器, 车身加速度的均方根值较大; 而采用改进 BP 神经网络控制器, 车身加速度的均方根值较小。根据图 6 可得, 采用 BP 神经网络控制器, 车辆悬架行程均方值较大; 而采用改进 BP 神经网络控制器, 车辆悬架行程均方值较小。根据图 7 可得: 采用 BP 神经网络控制器, 车身位移均方根值较大, 而采用改进 BP 神经网络控制器, 车身位移均方根值较小。分析图 5-图 7 仿真结果可知, 采用改进粒子群算法优化 BP 神经网络控制器, 车身加速度、悬架行程和轮胎位移的均方根值都大幅度下降, 降低悬架上下振动幅度, 改善驾驶员乘坐舒适性。

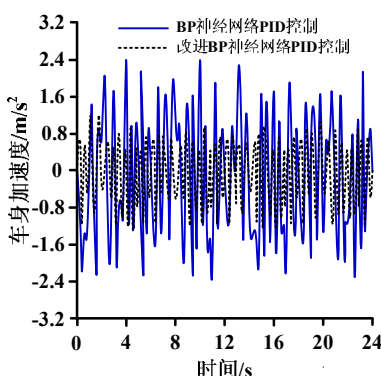


图 5 车身加速度仿真结果

Fig.5 Simulation results of body acceleration

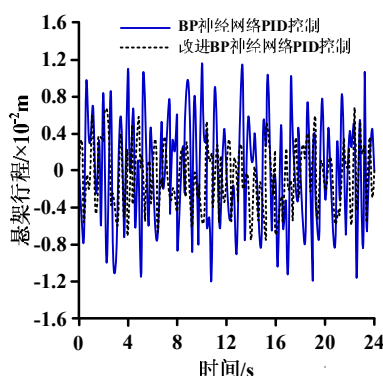


图 6 悬架行程仿真结果

Fig.6 Simulation results of suspension travel

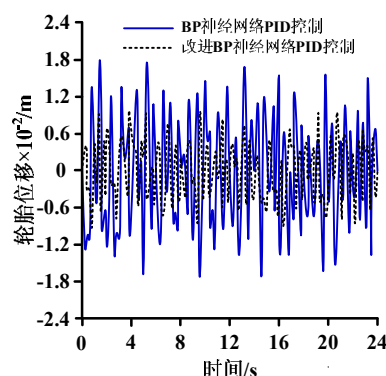


图 7 轮胎位移仿真结果

Fig.7 Simulation results of tire displacement

5 结语

本文研究了 1/4 悬架平面简图模型, 推导出车辆悬架振动微分方程式。引用增量式 PID 控制器, 采用 BP 三层神经网络结构, 设计出神经网络 PID

控制器, 构造出全局最优值适应度函数。对传统粒子群算法进行改进, 将改进粒子群算法优化 BP 神经网络结构, 采用 Matlab 软件对车辆悬架参数进行仿真, 并且神经网络 PID 控制器进行对比和分析。仿真结果显示: 优化后, 车辆垂直速度、悬架行程

及车辆位移峰值下降,整体波动幅度较小。改进神经网络 PID 控制器能够提高车辆行驶的稳定性,避免车辆发生侧翻现象。

参考文献:

- [1] 曹培雷,王吉龙,刘卫华. 工程车辆主动悬架控制器的设计与仿真[J]. 流体振动控制,2014(3):22-25.
- [2] 刘前结. 基于 MRD 的 1/4 车辆半主动悬架系统混合控制研究[D]. 南昌:华东交通大学,2018.
- [3] 孟杰,陈庆樟,张凯. 基于粒子群算法的汽车悬架 PID 控制仿真[J]. 计算机仿真,2013,30(4):155-158.
- [4] 李洁,黄艳宾,杨静,等. 汽车悬架的 PID 控制仿真研究[J]. 系统科学学报,2018,26(2):101-104.
- [5] 刘凯,廖然. 基于 RBF 神经网络的 PID 车辆主动悬架控制[J]. 制造业自动化,2018,40(9):87-89.
- [6] 蒋培露. 车辆主动悬架的控制与仿真研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2015.
- [7] Ashkan Haji Hosseinloo, Nader Vahdati, Fook Fah Yap. Performance of spade-less wheeled military vehicles with passive and semi-active suspensions during mortar firing[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(10): 1517-1535.
- [8] Zhong J, Fan Z, Zhu Y H, et al. One nonlinear PID control to improve the control performance of a manipulator actuated by a pneumatic muscle actuator[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 125(5):369-378.
- [9] Li T H, He P. Research on the Automotive Suspension Based on BP Neural Network[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 341(10):478-481.
- [10] 王伟倩. 基于改进粒子群的双层规划求解算法研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
- [11] Narges N, Mohsen S A, Reza T K M. Modified particle swarm optimization in a time-dependent vehicle routing problem: minimizing fuel consumption[J]. Optimization Letters, 2017, 11(1):123 -132.
- [12] 时培磊,时培成. 二级减速式轮边驱动系统设计与仿真[J]. 井冈山大学学报:自然科学版,2018,39(1):72-76.

(上接第 56 页)

- [5] Monika K Y, Vidushi S, Neeti G, et al. Taking MQTT and NodeMcu to IOT: Communication in Internet of Things[J]. Procedia Computer Science, 2018, 2(12):46-56.
- [6] Suresh M J, Neema M, et al. Hardware Implementation of Blowfish Algorithm for the Secure Data Transmission in Internet of Things[J]. Procedia Technology, 2016, 12(1):248-255.
- [7] Wu Z, Liu L H. A Community Health Service Architecture Based on the Internet of Things on Health-Care[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 25(03):114-120.
- [8] Shen W Z. Design of Greenhouse Environment Control System Based on Internet of Things[J]. Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), 2018, 25(02):54-64.
- [9] Praveen K R, Rajasekhara B B. Energy Efficient Cluster Head Selection for Internet of Things[J]. New Review of Information Networking, 2017, 22(1):266-273.
- [10] Zhang Y J, He J S, Muhammad S P. An Asymmetric Transport Protocol for Internet of Things[J]. Procedia Computer Science, 2017, 10(7):636-641.
- [11] Jenifer S. Surveillance in ubiquitous network societies: normative conflicts related to the consumer in-store supermarket experience in the context of the Internet of Things[J]. Ethics and Information Technology, 2014, 16(1):27-41.
- [12] Slavyana K, Miroslav G, Vladislav V, et al. On Modeling the Psychology of Wireless Node Interactions in the Context of Internet of Things[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 8(1): 101-136.
- [13] Xuan X Y, Zhi C, Ye T. A lightweight attribute-based encryption scheme for the Internet of Things[J]. Future Generation Computer Systems, 2015, 4(9):104-112.