

# 半主动空气悬架 BP-PID 控制器设计及其随机路面验证

班小强<sup>1</sup>,覃桂全<sup>2</sup>

(1. 广东南方职业学院 智能制造学院,广东 江门 529000; 2. 迈博自动化机械有限公司,广东 江门 529000)

**摘要:**在综合考虑算法精度与效率的条件下,设计一种新的汽车半主动悬架 BP-PID 控制模型,在该算法中融合神经网络控制器的鲁棒特性。通过神经网络完成 PID 参数的在线整定功能,并达到对非线性函数进行快速逼近与自主学习的过程,充分克服非线性悬架系统的表述偏差缺陷。利用高斯白噪声以及成形滤波器来随机调控路面轮廓的不平度,在 Matlab/Simulink 平台开展路面模拟信号验证分析。测试结果表明:BP-PID 控制的汽车悬架可以显著减小车身加速度,获得更舒适的乘坐性能。

**关键词:**汽车悬架;神经网络;PID 控制器;仿真;随机路面

**中图分类号:**TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0217-03

## Design of BP-PID Controller for Semi-active Air Suspension and Its Random Pavement Verification

BAN Xiaoqiang<sup>1</sup>, QIN Guiquan<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Guangdong Southern Vocational College, Jiangmen 529000, China;

2. Maibo Automation Machinery Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

**Abstract:** In comprehensive consideration of algorithm accuracy and efficiency, a new BP-PID control model of semi-active suspension was designed, into which, the robustness of the neural network controller was integrated. The online tuning function of PID parameters is completed by neural network to achieve the process of fast approximation and self-learning of nonlinear functions, which fully overcomes the defect of expression deviation of nonlinear suspension system. Gaussian white noise and shaping filter were used to regulate the roughness of road profile in random and the road simulation signal was verified and analyzed on Matlab/Simulink platform. The test results show that the vehicle suspension controlled by BP-PID can significantly reduce the body acceleration and obtain more comfortable ride performance.

**Keywords:** suspension; neural network; PID controller; simulation; random road

## 0 引言

半主动悬架作为一种广泛应用于控制汽车行驶平稳性的悬架结构,其控制机理为只调整悬架阻尼特性参数,而悬架刚度保持恒定,因此这种结构并不能提供动力源,只包含所需的阻尼部件<sup>[1-2]</sup>。半主动悬架的整体结构较简单,具备高可行性,在实际工作阶段不会造成车辆动力的损耗,对于优化汽车产品控制性能发挥了重要作用,有效保障汽车行驶过程的舒适性、操控稳定性、安全性<sup>[3-4]</sup>。针对道路表面不平整的情况,有研究人员将油气悬架加入汽车中并对其进行了使用测试,实现了车辆行驶控制特性的显著提升。为油气悬架设置主动控制结构后,可以同时发挥油气悬架自身优势以及根据车辆路况特点实现悬架性能的调控,确保车辆达到理想的行驶稳定性<sup>[5]</sup>。

相关方面的研究吸引了很多的研究学者。陈登攀等<sup>[6]</sup>开发了一种可以对主动悬架进行优化控制的算法,同时利用 Matlab/Simulink 构建得到包含 4 自由度的模型

并对上述悬架开展仿真测试。根据仿真结果发现,采用 GA 优化处理得到的 LQG 控制算法可以显著提升主动悬架系统的运行平顺性,同时乘坐舒适性也明显获得改善。武柏安等<sup>[7]</sup>则根据遗传算法开发得到了半主动悬架的优化控制技术,经仿真测试发现,通过遗传算法设置控制器加权系数时,有助于车辆达到更加平顺的控制性能。李以农等<sup>[8]</sup>通过模型仿真的方法构建得到主动悬架自适应滑模控制器,之后以自适应模糊神经网络算法完成路面等级的识别功能,并为控制器设置了合适的目标系数,最终实现主动悬架在舒适与安全间的相互协调。

相比较目前的学习算法,传统的 PID 控制精度不高。目前研究几乎放弃了传统的 PID 控制,这在一定程度上有些不切实际。本文综合考虑算法精度与效率的条件下设计了一种新的 BP-PID 控制模型,弥补了传统 PID 控制的不足,在该算法中融合了神经网络控制器的鲁棒特性。通过神经网络完成 PID 参数的在线整定功能,通过神经网络来达到对非线性函数进行快速逼近与自主学习的过程,充分克服非线性悬架系统存在表述偏差的缺陷。根据测试

基金项目:2020 年广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX388)

第一作者简介:班小强(1982—),女,黑龙江齐齐哈尔人,高级工程师,本科,研究方向为电气控制自动化设计。

结果可知,以 BP-PID 控制器设置的悬架具备更优平顺性与适应能力,同时鲁棒性也获得显著改善。

### 1 悬架模型

图 1 显示了针对汽车悬架构建的二自由度 1/4 模型,将其表示成以下的运动方程:

$$m_b \ddot{Z}_b - U + K_s [Z_b(t) - Z_w(t)] = 0 \quad (1)$$

$$m_w \ddot{Z}_w(t) + U - K_s [Z_b(t) - Z_w(t)] + K_t [Z_w(t) - Z_r(t)] = 0 \quad (2)$$

式中: $m_w$  表示非簧载质量; $m_b$  表示簧载质量; $Z_r$  表示路面位移; $Z_w$  表示车轮位移; $U$  表示主动控制力; $K_s$  表示油气弹簧刚度; $Z_b$  表示车身位移; $K_t$  表示轮胎等效刚度。

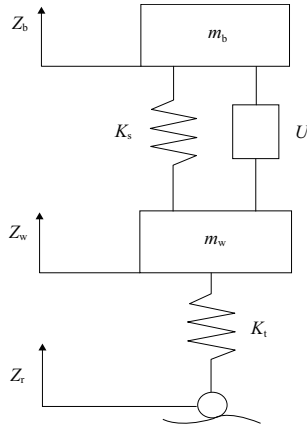


图 1 汽车悬架力学模型

图 2 给出了主动悬架系统的状态变量图,其中  $V$  表示车辆行驶速度,  $G_0$  表示道路的不平度系数。

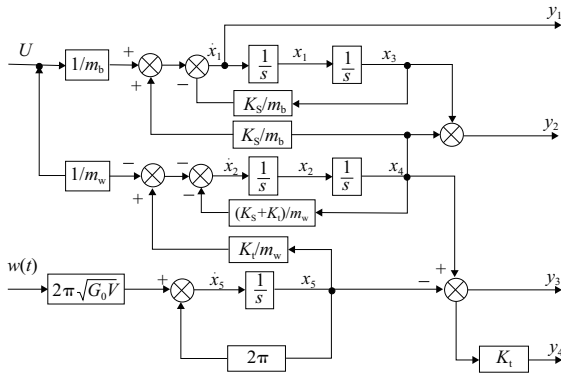


图 2 主动悬架系统的状态变量图

### 2 BP-PID 控制器设计

增量型数字 PID 控制算法表达式<sup>[9]</sup>为

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

式中: $u$  表示控制器输出; $e$  表示系统真实输出( $y$ )相对设计输出( $r$ )的差值; $k, k-1, k-2$  分别对应相应次数迭代后的控制量。

选择 4-5-3 的三层结构的神将网络进行处理,  $[r(k), y(k), e(k), 1]$  表示神经网络的输入。

网络输入格式为

$$O_j^{(1)} = x(j) \quad j=1, 2, 3 \quad (4)$$

同时将隐含层输入、输出表示成

$$n_{ei}^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^4 w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \quad (5)$$

$$O_i^{(2)}(k) = f(n_{ei}^{(2)}(k)) \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (6)$$

式中  $w_{ij}^{(2)}$  表示隐含层的加权系数。

采用正负对称结构的 sigmoid 函数设置隐含层神经元活化函数:

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

输出层中包含的 3 个输出接点依次为 PID 控制器的调节参数  $K_p, K_i, K_d$ , 各参数取值都为正值,由此可以判断输出层神经元活化函数属于一种非负 sigmoid 函数,将其表示成以下的形式:

$$g(x) = \frac{1}{2}(1 + \tanh(x)) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (8)$$

性能指标函数  $E(k)$  计算式为

$$E(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k))^2 \quad (9)$$

利用梯度下降法对网络权系数进行修正,同时新增一惯性项使搜索结果完成快速收敛过程。

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (10)$$

式中: $\eta$  表示学习速率; $\alpha$  表示惯性系数。

根据上述分析可以得到网络输出层权的以下学习算法:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_i^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (11)$$

$$\delta_i^{(3)} = e(k) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)}\right) \frac{\partial u(k)}{\partial O_i^{(3)}(k)} g'(n_{ei}^{(3)}(k)) \quad (i=1, 2, 3) \quad (12)$$

同时得到以下的隐含层加权系数算法:

$$\Delta w_{ij}^{(2)}(k) = \alpha \Delta w_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) \quad (13)$$

$$\delta_i^{(2)} = f'(n_{ei}^{(2)}(k)) \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} w_{li}^{(3)}(k) \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (14)$$

### 3 随机路面验证

#### 3.1 路面模型

利用高斯白噪声以及成形滤波器来随机调控路面轮廓的不平度。随机面  $Z_r(t)$  输入为

$$\dot{Z}_r(t) = -2\pi f_0 Z_r(t) + 2\pi \sqrt{G_0 V} w(t) \quad (15)$$

式中  $w(t)$  表示高斯白噪声信号。

#### 3.2 结果分析

利用 Matlab/Simulink 构建图 3 中的 1/4 车辆悬架动力模型和控制器模型<sup>[10]</sup>。为了对实际控制效果进行验证分析,对悬架结构开展了仿真测试。将路面模拟信号输入系统中,同时根据汽车设置以下仿真参数:

$m_b = 360 \text{ kg}, m_s = 40 \text{ kg}, C_s = 1 \text{ 000 kg}, K_s = 20 \text{ 000 N/m}, K_t = 200 \text{ 000 N/m}, G_0 = 5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3, V = 20 \text{ m/s}$ , 滤波器截止频率  $f_0 = 0.01 \text{ Hz}$ 。

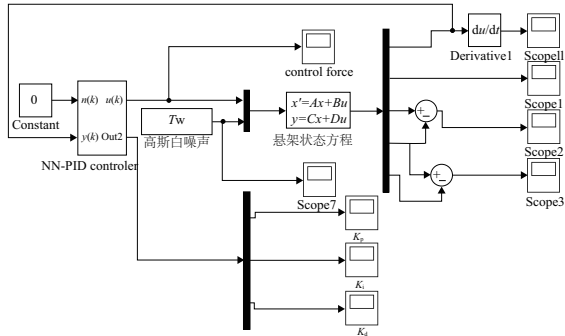


图3 BP-PID 悬架 Matlab 仿真模型

以下是对 BP-PID 控制器进行仿真测试的具体步骤。

- 1) 系统初始化, 设定  $w_j^{(1)}(0)$  与  $w_i^{(2)}(0)$  初始参数, 同时设定  $\alpha=0.02, \eta=0.9, k=1$ 。
- 2) 实时采集车身的加速度  $y(k)$ 。
- 3) 根据神经网络的内部计算结果获得  $K_p, K_i, K_d$  参数, 再将其传输至 PID 控制器中。
- 4) 利用式(4)计算 PID 控制器的输出  $u(k)$ 。
- 5) 通过式(8)与式(9)调节神经网络隐含层的加权系数, 由此完成 PID 参数的自整定过程。
- 6) 计算  $k=k+1$ , 重新跳转至步骤 2)。

关于主要参数: 车身加速度, 悬架动挠度轮胎动挠度的仿真测试得到图4-图6所示的结果, 结果见表1。根据表1可以发现, BP-PID 悬架可以显著减小车身加速度, 通过计算标准差发现相对 LQG 主动控制悬架降低了近 80%, 从而获得更舒适的乘坐性能。经过上述处理后, 悬架动行程的标准差减小, 但并未达到 LQG 悬架的优化性能。

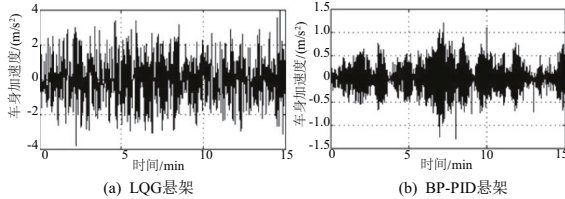


图4 车身加速度响应结果

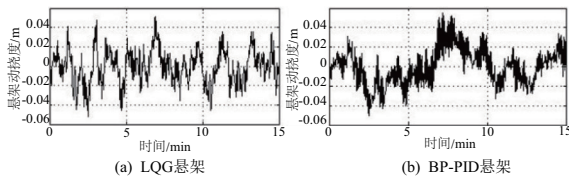


图5 悬架动挠度响应结果

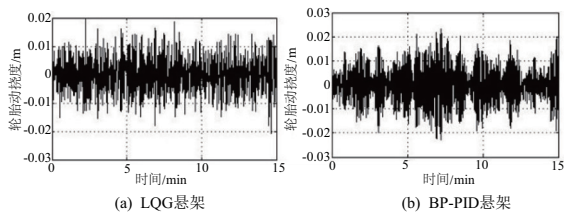


图6 轮胎动挠度响应结果

表1 仿真结果比较

仿真参数	LQG 悬架	BP-PID 悬架
车身加速度标准差/(m/s <sup>2</sup> )	1.215 3	0.275 8
悬架动挠度标准差/m	0.013 6	0.016 1
轮胎动挠度标准差/m	0.005 8	0.007 6

LQG 控制悬架可以实现车身加速度的均匀降低, 并使悬架和轮胎的动挠度也显著减小。这是由于可以利用 LQG 控制器提取上述状态量, 并通过设置合适加权系数来实现均衡控制的性能。不过也需注意 LQG 控制器属于一种线性控制结构, 无法满足优异鲁棒性, 特别是在处理具有非线性刚度的悬架结构时, 建立的仿真模型存在明显偏差, 因此使用 LQG 控制器并不能达到跟仿真过程同样的控制性能。

BP-PID 控制悬架对于控制车身加速度存在显著优势, 而悬架动挠度控制性能相对 LQG 控制器更差。这是因为 BP-PID 控制器只提取车身加速度参数来实现悬架的控制, 而没有充分考虑其他因素造成的干扰, 因此只是单纯关注车身加速度的提升<sup>[1]</sup>。根据以上分析可知车身加速度和悬架动挠度存在相互矛盾的缺陷, 为降低路面噪声引起的车身结构变化以达到良好平顺性, 从而需要选择较“软”的悬架, 由此增大了悬架的动行程, 引起轮胎动载荷的明显改变, 降低了车辆的操控稳定性。

从能源消耗角度分析, LQG 控制悬架可以达到  $\pm 1\ 000\ \text{N}$  的控制力变化幅值, BP-PID 控制悬架则达到  $\pm 1\ 500\ \text{N}$  幅值, 由此可以判断 BP-PID 控制悬架更满足节能环保的控制要求, 并且 LQG 控制器具备更简化的结构, 不需要使用很高要求的控制系统硬件。

## 4 结语

BP-PID 悬架可以显著减小车身加速度, 获得更舒适的乘坐性能。BP-PID 控制悬架对于控制车身加速度存在显著优势, BP-PID 控制悬架则达到  $\pm 1\ 500\ \text{N}$  幅值, 由此可以判断 BP-PID 控制悬架更满足节能环保的控制要求; 并且 LQG 控制器具备更简化的结构, 不需要使用很高要求的控制系统硬件。BP-PID 控制器表现出了更优的鲁棒性能与非线性特性, 能够更明显降低车身加速度, 具备良好的未来应用前景。

### 参考文献:

- [1] 毛明. 新能源汽车轻量化底盘悬架系统智能制造技术[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 224-226.
- [2] 徐旭, 杨晓峰, 沈钰杰, 等. 基于滞后型系统理论的半主动悬架控制系统稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(7): 208-215.
- [3] 李刚, 顾瑞恒, 胡国良, 等. 车辆磁流变半主动空气悬架模糊滑模控制研究[J]. 现代制造工程, 2021(2): 49-57.
- [4] 刘晓昂, 张佳琪, 王爽. 基于模糊比例积分微分算法的汽车半主动悬架振动分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 781-785.
- [5] 徐明, 黄庆生, 李刚. 车辆半主动悬架智能控制方法研究现状[J]. 机床与液压, 2021, 49(1): 169-174.

(下转第 235 页)

为了进一步验证所提方法控制性能的好坏,实验将石油钻机钻速自动控制精度作为测试指标。其中,控制精度越高,说明控制效果越好。实验对比结果如图4所示。

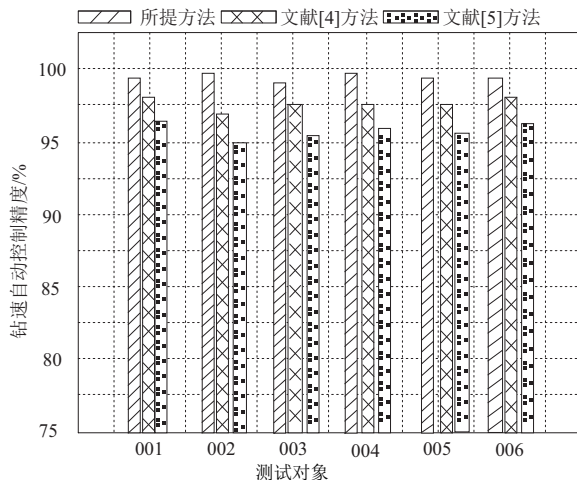


图4 不同方法的钻速自动控制精度对比结果

分析图4中的实验数据可知,所提方法的石油钻机钻速自动控制精度最高;文献[4]方法次之;文献[5]方法最低。由此可见,所提方法具有更好的控制效果。

### 3) 石油钻机钻速自动控制响应时间测试分析

实验分析3种不同方法在不同测试样本下的控制响应时间变化情况,具体实验结果如表1所示。

表1 不同方法的控制响应时间对比

测试数量/个	钻速自动控制响应时间/s		
	所提方法	文献[4]方法	文献[5]方法
10	34.5	40.6	45.8
15	47.8	49.5	52.6
20	56.4	59.2	69.4
25	63.3	66.8	75.8
30	75.4	77.9	80.1
35	84.6	88.2	90.4
40	88.7	93.4	99.6
45	94.6	97.2	107.5
50	105.7	108.4	116.4

分析表1中的实验数据可知,当石油钻机的数量增加,各个方法对应的钻速自动控制响应时间也开始呈直线

上升趋势。但是相比文献[4]方法和文献[5]方法,所提方法的控制响应时间明显较少一些,说明所提方法能够以较快的速度实现石油钻机钻速自动控制,从而充分验证了所提方法的优越性。

## 3 结语

针对传统方法存在的不足,本研究结合S曲线加减速方法设计了新的石油钻机钻速自动控制方法。经实验测试证明,所提方法能够有效提升控制效率提高量和控制精度,同时还能够有效降低控制时间,更好地完成石油钻机钻速自动控制。但是由于时间以及人为等多方面因素的限制,致使所提方法仍然存在一定的不足,后续将对其开展更深入的研究。

### 参考文献:

- [1] 张东海,王昌荣. 智能石油钻机技术现状及发展方向[J]. 石油机械,2020,48(7):30-36.
- [2] 何庆,马广蛇,张洪,等. 基于云平台的钻机远程状态监测与诊断系统[J]. 石油机械,2019,47(8):47-54.
- [3] 丛成. 石油钻井机械钻速转矩自动控制方法研究[J]. 自动化与仪器仪表,2020(4):85-88.
- [4] 汪首坤,胡晓宇,史晓新,等. 基于3参量的加速度控制方法研究[J]. 北京理工大学学报,2020,40(4):434-440.
- [5] 刘清友,刘文全,朱海燕,等. 钻井机器人的连续油管钻压和钻速控制模型[J]. 石油学报,2019,40(10):1255-1262.
- [6] 林旭军,张树有,王进,等. 可去除自交且具有可调节光滑的非均匀有理B样条等距曲线生成方法[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(8):1920-1926.
- [7] 任利娟,张广鹏,王元,等. 基于压缩控制点的B样条曲线重构算法[J]. 西安理工大学学报,2019,35(2):163-171.
- [8] 周湛清,夏长亮. 永磁电机增量式直接预测速度控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(6):94-102.
- [9] 梁奇敏,李剑,聂臻,等. 基于转矩的安全钻进控制[J]. 中国矿业,2019,28(5):53-56,76.
- [10] 李建亭. 石油钻机平移棘爪步行器卡爪失效分析及优化[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):75-77.
- [11] 江本赤,王建彬,苏学满. 辛普森积分法在双NURBS曲线随动插补中的应用[J]. 机械科学与技术,2019,38(1):96-103.
- [12] 耿焕同,周山胜,陈哲,等. 基于分解的预测型动态多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2019,34(6):1307-1318.

收稿日期:2021-08-30

(上接第219页)

- [6] 陈登攀,朱建军,黄稟通,等. 对汽车主动悬架LQG算法的优化仿真研究[J]. 计算机仿真,2021,38(6):72-77.
- [7] 武柏安,龙海洋,李耀刚,等. 基于遗传算法的磁流变半主动悬架最优控制[J]. 机床与液压,2021,49(9):109-114.
- [8] 李以农,朱哲葳,郑玲,等. 基于路面识别的主动悬架多目标控制与优化[J]. 交通运输工程学报,2021,21(2):129-137.

- [9] 时培成,徐增伟,王锁,等. 变论域自适应模糊PID主动悬架控制研究[J]. 机械科学与技术,2019,38(5):713-720.
- [10] 寇发荣,李冬,许家楠,等. 车辆电动静液压主动悬架内模PID控制研究[J]. 液压与气动,2018(6):1-7.
- [11] 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.

收稿日期:2021-07-28