

基于 RBF 神经网络的油气悬架平顺性研究

段捷^{1*}, 陈禧龙¹, 杨宏杰¹, 赵河明¹, 赵韬硕², 丁明军³,
孔德景⁴, 于静⁴

(1.中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2.中国北方车辆研究所, 北京 100072; 3.淮海工业集团有限公司, 山西 长治 046012; 4.中国船舶集团有限公司第七一四研究所, 北京 100101)

摘要: **目的** 提高整车的行驶性能, 使车辆可以自主调节, 以适应各种不同的路面, 从而达到良好的缓冲效果。**方法** 以双气室油气弹簧为研究对象, 对其组成和工作原理进行详细分析, 推导出油气弹簧的阻尼力和刚度等非线性特性与车身位移的关系。根据 RBF 神经网络控制原理, 设计 RBF-PID 控制器, 依靠神经网络自学习性对 PID 参数动态整定, 使整个车身振动衰减, 快速达到稳定状态, 并基于 Matlab/Simulink 平台建立仿真模型, 在 B 级和 C 级不平路面输入的情况下, 重点对轮胎动载荷、车身质心加速度以及油气悬挂动挠度等 3 项性能进行仿真和分析。**结果** 同普通 PID 控制相比, RBF-PID 控制下, 车身 3 项性能 RMS 分别降低 26%、54%、0.1%。**结论** RBF-PID 控制能够克服环境影响, 实现油气弹簧特性的可靠控制, 提高了车辆行驶的平顺性以及稳定性。

关键词: 油气弹簧; 自主调节; 动态整定; RBF-PID 控制器; 快速稳定; 可靠控制

中图分类号: U463.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)03-0113-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.015

Ride Comfort of Hydro-pneumatic Suspension Based on RBF Neural Network

DUAN Jie^{1*}, CHEN Xilong¹, YANG Hongjie¹, ZHAO Heming¹, ZHAO Taoshuo²,
DING Mingjun³, KONG Dejing⁴, YU Jing⁴

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China; 3. Huaihai Industries Group Co., Ltd., Shanxi Changzhi 046012, China; 4. Shipbuilding Information Centre of China, Beijing 100101, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the driving performance of the whole vehicle so that the vehicle can autonomic conditioning to adapt to a variety of different road surfaces to achieve a good buffer effect. The composition and working principle and relationship between the damping force and stiffness of hydro-pneumatic spring and the displacement of vehicle body was deduced in detail. According to the principle of RBF neural network control, a RBF-PID controller was designed, and the PID parameters were dynamically adjusted by the self-learning habit of neural network, so that the vibration of the whole body attenuated and reached a stable state quickly. A simulation model was established based on Matlab/Simulink platform. With the

收稿日期: 2024-01-26; 修订日期: 2024-02-26

Received: 2024-01-26; Revised: 2024-02-26

基金项目: 国防科工局技术基金项目 (JSZL2020208B002)

Fund: National Defense Science and Industry Bureau Technology Foundation Project (JSZL2020208B002)

引文格式: 段捷, 陈禧龙, 杨宏杰, 等. 基于 RBF 神经网络的油气悬架平顺性研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 113-120.

DUAN Jie, CHEN Xilong, YANG Hongjie, et al. Ride Comfort of Hydro-pneumatic Suspension Based on RBF Neural Network[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 113-120.

*通信作者 (Corresponding author)

input of Class B and Class C uneven road surface, the three performances of tire dynamic load, body centroids acceleration and dynamic deflection of oil-gas suspension were simulated and analyzed. Compared with the ordinary PID control, the RMSE of three performance of the body under RBF-PID control was reduced by 26%, 54% and 0.3% respectively. RBF-PID control can overcome the impact of the environment, realize the reliable control of the characteristics of the oil-gas spring, and improve the ride comfort and stability of the vehicle.

KEY WORDS: hydro-pneumatic spring; autonomic conditioning; dynamically adjusted; RBF-PID controller; reach stable state quickly; reliable control

悬架是车辆的重要组成部分,它起着传递力和力矩以及衰减行驶在不同路面引起的车身振动的作用,它的性能直接影响到车辆系统的操纵稳定性、行驶平顺性和安全性。随着生活水平的提高,人们要求悬架不仅能适应普通的城市及乡村道路,还可在野外行驶,适应崎岖不平的路面。被动悬架由于结构参数固定,不能考虑动态性能,不能适应各种复杂路况。因此,可根据不同路况,调整系统阻尼或刚度的可控油气悬架系统得到了广泛的研究^[1-3]。

针对油气悬架的控制问题,研究者们做了许多探索。Zhou 等^[4]设计了一种可以在不同路面和驾驶条件下切换并能稳定操纵的滑模控制器,然后采用并行自适应克隆选择算法对控制器参数进行在线整定。结果表明,与传统的滑模控制悬架相比,车辆性能显著提高,但是当阈值开关起作用,控制器进行切换时,会引起车身的异常抖动。Zhu 等^[5]设计了一种通过线性控制策略进行匹配的线性二次高斯(LQG)控制器,通过样机实验表明,该控制器下的油气悬挂惯性可调、空间小、能耗低,但是没有考虑多种路面行驶自适应的情况。侯京锋等^[6]采用改良的PID控制算法,设计了负载补偿策略,测试结果表明,该设计满足模态试验边界模拟要求,但是同样在模式切换的过程中存在瞬间位移过冲。虽然以上传统控制能取得一定的控制效果,但是存在对不同路面自适应能力弱、调控精度差等问题,为此研究者们又引进了神经网络控制算法。李娜^[7]将模糊神经网络与滑膜控制相结合,设计了自适应减振悬架,虽然能有效控制阻尼,但是应用滑模控制时不可避免地会出现抖振现象,对舒适性会有影响。李雅琦等^[8]将径向基神经网络(RBF)与反步滑模控制结合到了一起,对模型未知部分进行逼近,提高了悬架的整体性能,但是该策略需要确定的参数众多,调节难度大。

针对上述问题,本文基于RBF神经网络设计了RBF神经网络PID控制器,其对未知项有强大的逼近特性,通过其自学习性,可以动态调节油气弹簧PID控制器的3个控制参数,避免了控制策略动态调节而引发的抖振现象,并且需调节的控制器参数少,车辆可自适应不同的路面,悬架系统能及时稳定,保持行驶的平顺性。

1 主动悬架系统二自由度模型建立

油气悬挂系统通常将惰性气体和油液分别作为弹性和传力介质,通过油液在液压缸中的阻尼孔流动,借助压差形成阻尼力,通过压缩蓄能器中的气体形成弹性力^[9-10]。克服被动悬架参数固定缺点的主动悬架如图1所示。当车辆行驶在不同的路面时,主动悬架传感器采集车体速度、加速度以及位移等信号,并将其传输给控制器,控制器的控制策略经功率放大器通过控制比例方向阀来合理调控油箱向液压缸的充油方向和充油量,如此设置之后,油气悬架的刚度和阻尼均可自适应于不同的路面,并很好地吸收来自地面的冲击振动。

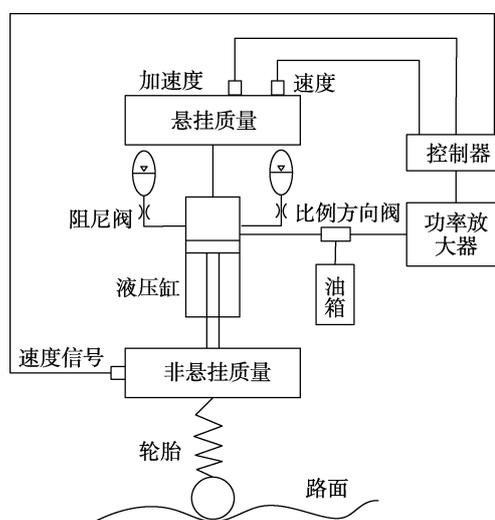


图1 主动油气悬架

Fig.1 Active hydro-pneumatic suspension

车辆是复杂的振动系统,为了分析方便,应将模型进行简化,而1/4车体动力学二自由度模型在车辆行驶安全性以及舒适性方面的研究中可以满足需求,本文所研究的1/4车体主动油气悬架二自由度模型如图2所示。

建立的1/4车体主动油气悬架二自由度数学模型^[11]:

$$\begin{aligned} m_w \ddot{X}_w + U - K_s(X - X_w) - C_s(\dot{X} - \dot{X}_w) + \\ K_t(X_w - X_r) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

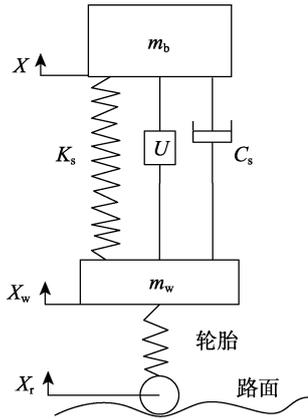


图 2 1/4 车体二自由度模型

Fig.2 Two degrees of freedom model of 1/4 car body

$$m_b \ddot{X} - U + K_s (X - X_w) + C_s (\dot{X} - \dot{X}_w) = 0 \quad (2)$$

式中: U 为在控制器作用下等效的可控作用力;

X_r 为路面激励; X_w 为负重轮位移; X 为车身质心位移; m_w 为负重轮质量; m_b 为车身质量; K_s 为悬挂刚度系数; K_t 为负重轮胎效刚度系数; C_s 为悬挂阻尼系数。

2 系统仿真模型建立

2.1 路面输入激励模型

对于不同场合、不同等级下的路面, 其粗糙度、不平度不同, 其中路面不平度功率谱密度表示为 $G_q(n)$, 通常取为^[12-14]:

$$G_q(n) = G_q(n_0) (n/n_0)^{-p} \quad (3)$$

式中: n_0 为参考空间频率; n 为空气频率; p 为频率指数。在 p 为 2 时, 根据 GB7031—2005 《车辆振动输-路面不平度表示方法》, 路面被分为从 A~H 等 8 个等级^[15], 见表 1。

表 1 路面不平度分类标准

Tab.1 Classification standard of pavement roughness

路面等级	$G_q(n_0) (n_0=0.1 \text{ m}^{-1})/(10^{-6} \text{ m}^3)$			路面描述
	下限	几何平均值	上限	
A	8	16	32	高速、国道、省道等铺装路面
B	32	64	128	平坦的土路、碎石路等铺装路面
C	128	256	512	大量土路、碎石、连续盘山路面
D	512	1 024	2 048	较多 10 cm 左右的凹凸、石块
E	2 048	4 096	8 192	20 cm 积雪路面, 及较长距离泥路
F	8 192	16 384	32 768	有 30 cm 高的石块, 50 cm 的硬底涉水
G	32 768	65 536	131 072	有 30 cm 凹凸, 30 cm 深的泥潭并且上坡
H	131 072	262 114	524 288	难度高于以上所有级别的路面

路面不平度的时域输入信号可以将白噪声通过成形滤波器得到, 其表达式为^[16]:

$$\dot{X}_r(t) = -2\pi f_0 X_r(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u w(t) \quad (4)$$

式中: $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数; f_0 为滤波器下截止频率, 取 $f_0=0.062 \text{ Hz}$ ^[17]; $w(t)$ 为均值为 0 的白噪声; u 为车辆行驶速度。

2.2 油气弹簧数学模型

油气弹簧作为弹性元件如图 3 所示, 常用于工业和机械装置中, 在车辆悬架装置中主要是用来起缓冲减振作用, 其弹性与阻尼元件设计为一体, 具有典型的非线性变刚度、渐增性的特点。当载荷增加时, 活塞推动油液压缩气体室的惰性气体, 提高了悬架的承载能力。油液及惰性气体质量和初始压力保持不变, 当载荷变小时, 惰性气体刚度小; 载荷较大时, 气体弹簧刚度大, 形成了油气弹簧变刚度特性。在载荷及压力稳定后, 可以通过液压控制回路调整车架及整车的高度^[18-21]。

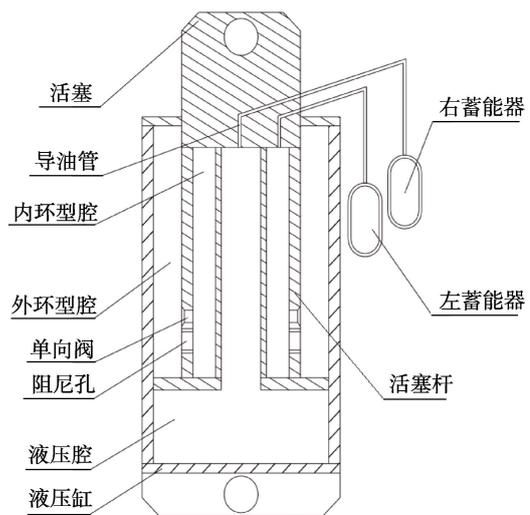


图 3 油气弹簧结构

Fig.3 Hydro-pneumatic spring

油气弹簧的工作原理: 当油气弹簧处于压缩行程时, 单向阀开启, 液压缸和活塞相对压缩, 油液因液

液压腔的体积减小,被挤压到与之相连的右蓄能器当中。外环型腔因活塞压缩体积变大,压力减小,内环型腔内的油液包括与之相连的左蓄能器的油液便经过单向阀和阻尼孔流入外环型腔,所以在此行程中主要是蓄能器中压缩气体产生的弹性力起减振作用。当油气弹簧处于拉伸行程时,单向阀关闭,液压缸和活塞相对拉伸,与液压腔相连的右蓄能器中的油液因其体积增大,流入液压腔。外环型腔因活塞移动体积变小,其中的油液仅能通过阻尼孔来流入内环型腔,由于内环型腔体积不变,所以流入的油液又被压入与之相连的左蓄能器中,而在此行程中主要是油液流经阻尼孔产生的阻尼力来缓减路面的冲击。

本文主要研究车辆本体的垂向运动,并且忽略活塞杆运动过程中与其他相配合的部件之间产生的摩擦力。经以上分析可知,油气弹簧的活塞杆受力表达式为^[22]:

$$F = P_2 S_2 - P_1 S_1 + G \quad (5)$$

式中: P_1 为液压腔 2 的压力; P_2 为外环型腔 5 的压力; S_1 为液压腔 2 的液压面积; S_2 为外环型腔 5 液压环形面积; G 为活塞杆所受车体的压力。

当系统达平衡时,连通器压力相等,表示为:

$$P_1 = P_R, P_2 = P_L \quad (6)$$

油气弹簧在动作时,活塞杆的运动相对较缓慢,所以认为左右蓄能器理想状态下为:

$$P_L V_L^r = P_{L0} V_{L0}^r = P_{LS} V_{LS}^r, P_R V_R^r = P_{R0} V_{R0}^r = P_{RS} V_{RS}^r \quad (7)$$

当活塞杆产生位移时,2个蓄能器的气体瞬时体积为:

$$V_L = V_{LS} - S_2 X, V_R = V_{RS} + S_1 X \quad (8)$$

式中: P_{LS} 、 P_{RS} 、 V_{LS} 、 V_{RS} 分别为平衡位置时左、右蓄能器气体压力和体积; P_{L0} 、 P_{R0} 、 V_{L0} 、 V_{R0} 分别为左、右蓄能器初始充气压力和体积; P_L 、 P_R 、 V_L 、 V_R 分别为左、右蓄能器瞬时气体压力和体积; r 为气体多变指数,通常取 1.2; M 为悬挂车身质量。因此,经联立及变形可以得到活塞杆的最终受力表达式:

$$F = \frac{P_0 V_0^r S_2}{\left[\frac{P_0 V_0 (S_1 - S_2)}{Mg} - S_2 X \right]^r} - \frac{P_0 V_0^r S_1}{\left[\frac{P_0 V_0 (S_1 - S_2)}{Mg} + S_1 X \right]^r} + G \quad (9)$$

油液经阻尼孔及单向阀产生的阻尼力 F_{Y1} 、由液压腔经导油管流入左蓄能器产生的阻尼力 F_{Y2} 、由液压腔经导油管流入右蓄能器产生的阻尼力 F_{Y3} 分别可表示为:

$$F_{Y1} = 0.5 \rho \frac{S_2^3 \dot{X}^2 \text{sign}(\dot{X})}{\left\{ n C_d \left[A_1 + A_2 (0.5 - 0.5 \text{sign}(\dot{X})) \right] \right\}^2} \quad (10)$$

$$F_{Y2} = 1.5 \rho \frac{S_2^3 \dot{X}^2}{A_3^2} \text{sign}(\dot{X}) \quad (11)$$

$$F_{Y3} = 1.5 \rho \frac{S_1^3 \dot{X}^2}{A_4^2} \text{sign}(\dot{X}) \quad (12)$$

式中: ρ 为油液密度; n 为阻尼孔和单向阀的对数; A_1 、 A_2 分别为阻尼孔和单向阀的等效面积; A_3 、 A_4 为油管截面积, $A_3 = A_4$; C_d 为流量系数。

因此,由式(10)、(11)、(12)可得总阻尼力 F_f 为:

$$F_f = F_{Y1} + F_{Y2} + F_{Y3} \quad (13)$$

为了体现油气悬架的优越性,特不做线性化处理,将式(1)、(2)中的 $K_s(X - X_w)$ 和 $C_s(\dot{X} - \dot{X}_w)$ 分别用 F 和 F_f 替换,式(10)、(11)、(12)中的 X 用 $(X - X_w)$ 替换,得:

$$F_f = F_{Y1} + F_{Y2} + F_{Y3} = \frac{0.5 \rho S_2^3 (\dot{X} - \dot{X}_w)^2 \text{sign}(\dot{X} - \dot{X}_w)}{\left\{ n C_d \left[A_1 + A_2 (0.5 - 0.5 \text{sign}(\dot{X} - \dot{X}_w)) \right] \right\}^2} + 1.5 \rho (\dot{X} - \dot{X}_w)^2 \text{sign}(\dot{X} - \dot{X}_w) \frac{(S_1^3 + S_2^3)}{A_4^2} \quad (14)$$

$$m_w \ddot{X}_w + U - F - F_f + K_t (X_w - X_r) = 0 \quad (15)$$

$$m_b \ddot{X} - U + F + F_f = 0 \quad (16)$$

3 RBF-PID 控制器设计

本文采用 RBF 神经网络对未知项进行识别,并动态调整 PID 控制器的 3 个参数,神经网络的辨识输出为:

$$y_m(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x})^T W \quad (17)$$

式中: \mathbf{x} 为输入向量, $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_u]$; u 为输入个数; W 为神经网络的权值; $h(\mathbf{x})$ 为高斯基函数,

$$h(\mathbf{x}) = [h_1, \dots, h_m]^T。$$

h_m 表示为^[23-24]:

$$h_m = \exp\left(-\frac{\|x - c_{sm}\|^2}{2b_{sm}^2}\right) \quad (18)$$

式中: m 为网络输出个数; c_{sm} 为高斯基函数的中心矢量; b_{sm} 为高斯基函数的基宽。

区别于设置固定的高斯基函数的中心矢量和基宽,本文 RBF 神经网络在逐渐逼近和调整的过程中,这 2 个参数通过梯度下降法也在不断地迭代更新,以中心矢量更新为例:

$$\begin{cases} \Delta b_{sm} = [y_o(k) - y(k)] W_m h_m \frac{\|x - c_{sm}\|^2}{2b_{sm}^3} \\ b_{sm}(k) = b_{sm}(k-1) + \eta_s \Delta b_{sm} + \\ \alpha_s [b_{sm}(k-1) - b_{sm}(k-2)] \end{cases} \quad (19)$$

式中: $y_o(k)$ 为被逼近函数的输出; $y(k)$ 为神经网络输出; η_s 为学习速率; α_s 为动量因子。

神经网络对 PID 参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的调整采用梯度下降法:

$$\begin{cases} \Delta k_p = -\eta_s \frac{\partial E}{k_p} = -\eta_s \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \eta_s \text{error}(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(1) \\ \Delta k_i = -\eta_s \frac{\partial E}{k_i} = -\eta_s \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \eta_s \text{error}(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(2) \\ \Delta k_d = -\eta_s \frac{\partial E}{k_d} = -\eta_s \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \eta_s \text{error}(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} xc(3) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} k_p(k) = k_p(k-1) + \Delta k_p + ek_p [k_p(k-1) - k_p(k-2)] \\ k_i(k) = k_i(k-1) + \Delta k_i + ek_i [k_i(k-1) - k_i(k-2)] \\ k_d(k) = k_d(k-1) + \Delta k_d + ek_d [k_d(k-1) - k_d(k-2)] \end{cases} \quad (21)$$

式中: ek_p 、 ek_i 、 ek_d 是 PID 三参数学习速率; $xc(1)$ 、 $xc(2)$ 、 $xc(3)$ 分别是 PID 的比例、积分、微分项输入。

RBF 神经网络整定 PID 控制系统的结构如图 4 所示, 将测得实际悬架动位移 (区间约为 $\pm 60 \text{ mm}$)、车身垂向加速度 (区间约为 $\pm 2 \text{ m/s}^2$)、轮胎动载荷 (区间约为 $\pm 15 \text{ 000 N}$)^[10] 与期望值的误差作为 PID 控制器的输入, 同时 RBF 神经网络对角度 PID 的三个参

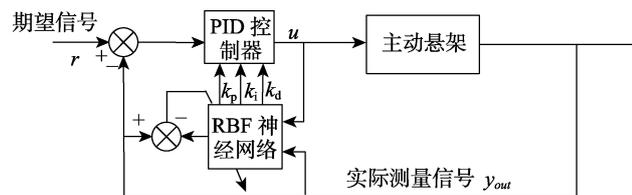


图 4 RBF-PID 控制系统结构
Fig.4 Structure of RBF-PID control system

数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行整定。RBF 神经网络整定流程如下:

- step1: RBF 神经网络参数中心矢量、基宽、权值以及 k_p 、 k_i 、 k_d 进行初始化, $k=1$;
- step2: 对输入信号 $r(k)$ 、系统输出 $y_{out}(k)$ 和 PID 控制器的输出 $u(k)$ 采样;
- step3: 计算单神经元的输出: k_p 、 k_i 、 k_d ;
- step4: 计算 RBF 神经网络的输出 $y(k)$, 得到系统的辨识信息 Jacobian 矩阵;
- step5: 基于辨识信息, 利用梯度下降法对 k_p 、 k_i 、 k_d 和神经网络参数进行一次迭代计算;
- step6: 进行下次采样控制, 且 $k=k+1$ 。

4 主动油气悬架性能仿真分析

油气悬挂的主要作用是吸收地面的冲击振动, 保持行驶的平顺性, 所以大致从轮胎动载荷、车身垂向加速度、悬挂动挠度 3 个方面来作为标准衡量悬挂性能的好坏^[25]。本文采用 Matlab/Simulink 仿真验证上述控制器的鲁棒及有效性, 系统 Simulink 仿真图如图 5 所示, 仿真参数^[10]见表 2。以随机滤波白噪声 B、C 级路面作为激励, 车辆速度设为 10 m/s , 仿真总时间为 20 s , 在条件和参数相同的情况下, 将本文控制方法 (RBF-PID) 与传统 PID 控制 (TPID)、被动悬架控制 (PCM) 进行对比, 仿真结果如图 6~9 所示。其中, 图 6 为路面时域模型, 仿真前 10 s 为 B 级路面, 后 10 s 为 C 级路面, 表 3 为系统输出的均方根值。

由图 6 可以看出, RBF-PID、TPID 与被动悬架 PCM 相比, 悬架的动挠度均有所减小, 但是减小的幅度小。这是因为被动悬架模型建立后, 其动挠度就

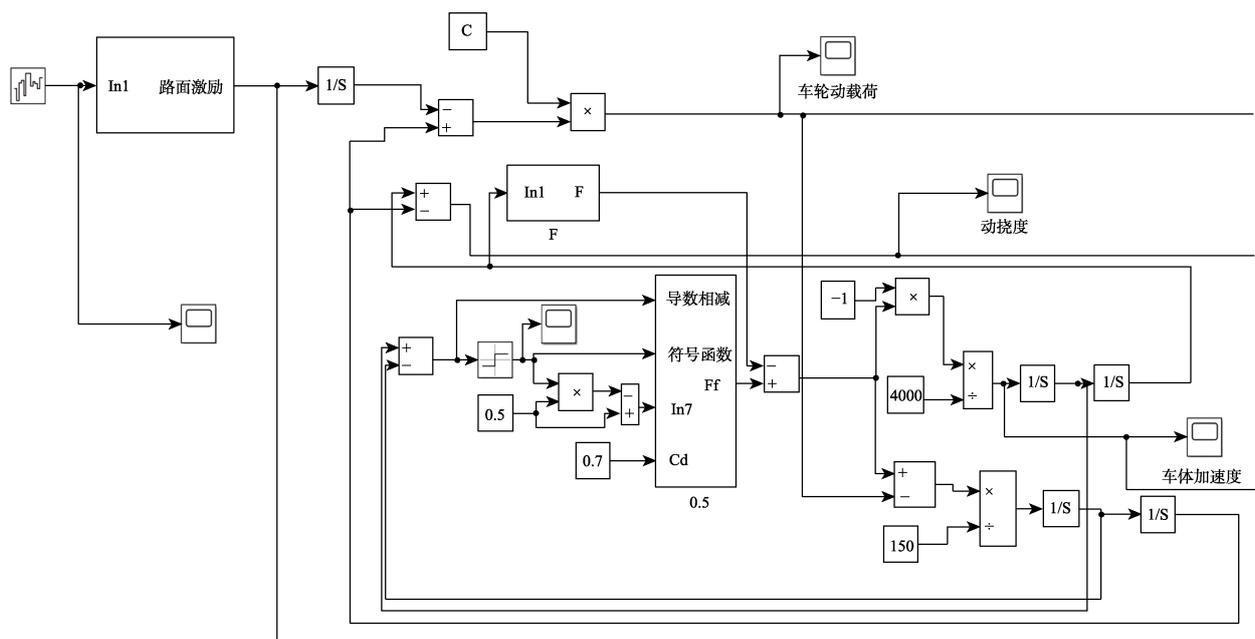


图 5 系统 Simulink 仿真图
Fig.5 System simulink simulation diagram

表 2 仿真参数
Tab.2 Simulation parameter

参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.9×10^3	C_d	0.7
$P_{L0}=P_{R0}=P_0/\text{Pa}$	3.5×10^6	$V_{L0}=V_{R0}=V_0/\text{Pa}$	4×10^{-3}
$A_1=A_2/\text{m}^2$	1.25×10^{-5}	$A_3=A_4/\text{m}^2$	0.000 131
S_1/m^2	0.007 9	S_2/m^2	0.005 1
M_b/kg	4 000	M_w/kg	150
η_s	0.57	α	0.25

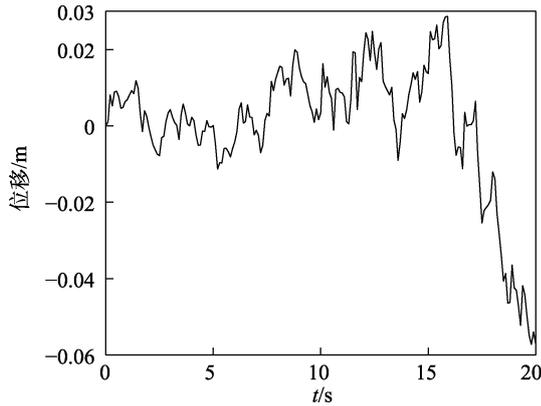


图 6 路面时域模型

Fig.6 Road surface model in time domain

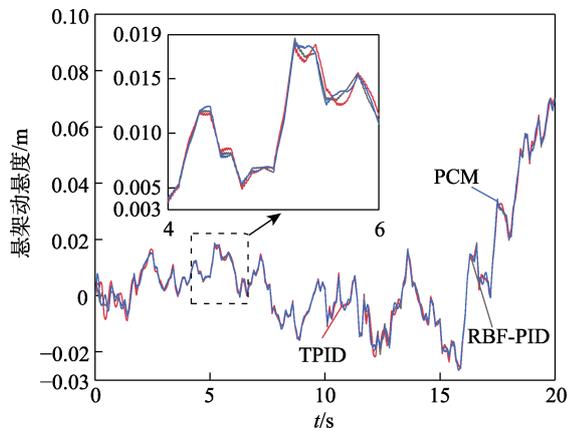


图 7 悬架动挠度-时间曲线

Fig.7 Suspension dynamic deflection-time curve

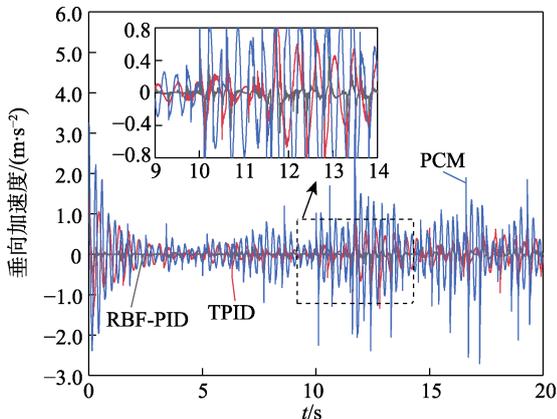


图 8 车身垂向加速度-时间曲线

Fig.8 Body vertical acceleration-time curve

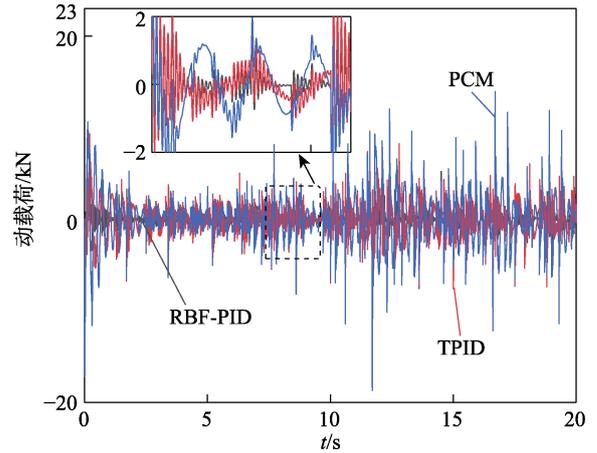


图 9 动载荷-时间曲线

Fig.9 Dynamic load-time curve

表 3 系统输出均方根值 RMS

Tab.3 RMS of system output

名称	RBF-PID	TPID	PCM
悬架动挠度	0.019 867	0.019 898	0.019 934
垂向加速度	0.131 917	0.289 773	0.586 889
动载荷	1242.308	1 697.548	2 557.888

已经达到了比较优越的程度,所以控制器在这项性能上表现不太明显。由表 3 可知,均方根值分别为 0.019 867、0.019 898、0.019 934,本文控制方法相较于其他 2 种方法分别降低 0.1%和 0.3%。相比之下,RBF-PID 控制方法在车身垂向加速度上的控制效果非常明显。由图 8 可以看出,3 种方法下车身均能稳定,但 PCM 控制下,在路面切换后,加速度变化剧烈,车身抖动较大,显然对不同的路面适应性较差。TPID 的控制效果相对 PCM 控制好些,而 RBF-PID 控制方法下,不同路面切换后的车身加速度趋于稳定的速度则是最快,幅度变化最小,相较于 TPID 和 PCM 控制分别降低 26%和 51%。由图 9 可以看出,RBF-PID 与 TPID 在动载荷性能上均取得了良好的控制效果,但 RBF-PID 控制下动载荷的变化幅度明显较小,路面切换后仍保持良好的控制效果,本文控制方法相较于 TPID 和 PCM 控制分别降低 54%和 77%。由图 7~9 可以看出,在仿真前 10 s,由于还处在 B 级路面,悬架动挠度、垂向加速度以及动载荷变化幅度不大,但在第 10 s 变为 C 级路面后,这 3 项性能的参数变化均较为明显,比较符合实际情况。总之,RBF-PID 与 TPID 控制均比被动悬架能取得良好的控制效果,但是 RBF-PID 的控制效果更加突出。

5 结论

本文利用 RBF 神经网络强大的自学习性,在原有被动悬架的基础上,设计了一种基于 RBF 神经网络的主动油气悬架系统,并进行了仿真验证,结论

如下:

1) 通过主动悬架系统的工作原理进行分析, 建立了主动悬架系统的数学模型, 并设计了 RBF-PID 控制器。通过 Matlab/Simulink 仿真结果可以出, 针对不同路面, RBF 神经网络可顺利动态调整 PID 的 3 项参数, 从而取得良好的控制效果。

2) 通过仿真结果证明, 对不同路面进行切换后, 车辆初期不可避免地出现一些相对大幅度的抖动, 但是与传统 PID 控制器以及被动悬架相比, RBF-PID 控制器可使车辆快速达到稳定状态, 自适应效果良好, 各项性能控制效果突出。

参考文献:

- [1] 闻华殿, 刘震涛, 赵韬硕, 等. 某型特种车辆油气弹簧的阻尼结构特性研究[J]. 机电工程, 2021, 38(9): 1091-1098.
WEN H D, LIU Z T, ZHAO T S, et al. Damping Structure Characteristics of Hydro-Pneumatic Spring for a Special Vehicle[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(9): 1091-1098.
- [2] 杨诚, 宋萍, 刘雄军, 等. 特种车辆油气弹簧漏气故障的识别与预测[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2536-2544.
YANG C, SONG P, LIU X J, et al. Gas Leakage Fault Recognition and Prognostics of Special Vehicle Hydro-Pneumatic Spring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2536-2544.
- [3] 崔国庆, 李阁强, 毛波, 等. 温度对油气弹簧工作特性影响的研究[J]. 机械设计与制造, 2024(1): 70-74.
CUI G Q, LI G Q, MAO B, et al. Research on the Influence of Temperature on the Characteristics of Hydro-Pneumatic Suspension[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 70-74.
- [4] 崔国庆, 李阁强, 毛波, 等. 温度对油气弹簧工作特性影响的研究[J]. 机械设计与制造, 2024(1): 70-74.
CUI G Q, LI G Q, MAO B, et al. Research on the Influence of Temperature on the Characteristics of Hydro-Pneumatic Suspension[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 70-74.
- [5] ZHOU C, LIU X H, XU F X, et al. Sliding Mode Switch Control of Adjustable Hydro-Pneumatic Suspension Based on Parallel Adaptive Clonal Selection Algorithm[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1852.
- [6] ZHU Z H, WANG R C, YANG L, et al. Modelling and Control of a Semi-Active Dual-Chamber Hydro-Pneumatic Inerter-Based Suspension System[J]. Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(9): 2355-2370.
- [7] 侯京锋, 郝岩研, 芮鹏, 等. 小型油气支承油气弹簧单元控制策略设计[J]. 强度与环境, 2021, 48(3): 59-64.
HOU J F, HAO Y Y, RUI P, et al. The Control Strategy Design of Hydro-Pneumatic Spring Module of Minitype Oil-Air Support System[J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(3): 59-64.
- [8] 李娜. 基于模糊神经网络的二自由度主动悬架滑模控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 101-104.
LI N. Design of Sliding Mode Control System for 2-DOF Active Suspension Based on Fuzzy Neural Network[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(9): 101-104.
- [9] 李雅琦, 李伟, 陈应鹏, 等. 基于 RBF 的主动悬架反演滑模控制策略研究[J]. 机电工程, 2020, 37(4): 425-428.
LI Y Q, LI W, CHEN Y P, et al. Active Suspension Inversion Sliding Mode Control Strategy Based on RBF[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(4): 425-428.
- [10] 张杰, 李守成, 时岩. 某特种车辆主动油气悬架的性能研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(4): 43-49.
ZHANG J, LI S C, SHI Y. Research on the Performance of an Special Vehicle Active Hydro-Pneumatic Suspension[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(4): 43-49.
- [11] 史忠校. 油气悬挂减振系统动力学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
SHI Z X. Dynamic Research on Hydro-Pneumatic Suspension Damping System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [12] YANG L, WANG R C, DING R K, et al. Investigation on the Dynamic Performance of a New Semi-Active Hydro-Pneumatic Inerter-Based Suspension System with MPC Control Strategy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154: 107569.
- [13] GUAN J, HUO D D, JI X X. Sliding Mode Force Tracking Control for Active Hydro-Pneumatic Suspension[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18: 458-475.
- [14] 杨芳. 车-路环境自适应下油气悬架系统的动力学与控制研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
YANG F. Study on Dynamics and Control of Hydro-Pneumatic Suspension System under Vehicle-Road Environment Adaptive Condition[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020.
- [15] SUN W C, ZHAO Y, LI J F, et al. Active Suspension Control with Frequency Band Constraints and Actuator Input Delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 530-537.
- [16] SATHISHKUMAR P, WANG R C, YANG L, et al. Trajectory Control for Tire Burst Vehicle Using the Standalone and Roll Interconnected Active Suspensions with Safety-Comfort Control Strategy[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142: 106776.
- [17] ZHANG X L, LIU J C, NIE J M, et al. Simulation Analysis and Experiment Research on Hydro-Pneumatic ISD Suspension[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 2095350.
- [18] TAN B H, WU Y, ZHANG N, et al. Improvement of Ride Quality for Patient Lying in Ambulance with a New Hydro-Pneumatic Suspension[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(4): 372-381.
- [19] SIAMI A, CIGADA A, KARIMI H R, et al. Using Inerter-Based Isolator for Passive Vibration Control of

- Michelangelo's Rondanini Pietà[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 13372-13377.
- [20] HE H, TAN P, HAO L F, et al. Optimal Design of Tuned Viscous Mass Damper for Acceleration Response Control of Civil Structures under Seismic Excitations[J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113685.
- [21] YIN C F, ZHAI X H, SUN X Q, et al. Design and Performance Research of a Hydro-Pneumatic Suspension with Variable Damping and Stiffness Characteristics[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(10): 4913-4923.
- [22] CHEN Q J, ZHAO Z P, ZHANG R F, et al. Impact of Soil-Structure Interaction on Structures with Inerter System[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 433: 1-15.
- [23] GROBLER J F. Multi-State Hydro-Pneumatic Suspension System through the Use of Magneto-Rheological (MR) Valves[J]. 2018, 25(5): 1621-1625.
- [24] MA D R, SONG M X, YU P C, et al. Research of RBF-PID Control in Maglev System[J]. Symmetry, 2020, 12(11): 1780.
- [25] LIN G H, LI H Y, AHN C K, et al. Event-Based Finite-Time Neural Control for Human-in-the-Loop UAV Attitude Systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 34(12): 10387-10397.
- [26] RAO K D, PAVANI K. Modelling and Vibration Control of Suspension System for Automobiles Using LQR and PID Controllers[J]. Asian Journal of Control, 2005, 7(2): 91-98.