

基于改进鲸鱼优化算法的主动悬架控制策略^{*}

李登科^{1,2} 冯晶晶^{1,2†} 王忠玉^{1,2} 孙睿翎^{1,2}

(1. 天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384)

(2. 天津理工大学 机电工程国家级实验教学示范中心, 天津 300384)

摘要 汽车主动悬架一直是汽车悬架控制领域的研究热点, 而主动悬架中控制器的选取以及相关参数的设定决定了主动悬架的优劣. 针对控制器相关参数如何快速、准确地对真实路面情况进行自适应调整问题, 本文对鲸鱼优化算法进行改进作为 Smith-PID 控制器参数调整算法, 设计了一款基于改进鲸鱼优化算法参数自整定 PID 控制器. 该悬架结合悬架动挠度、车身垂向加速度和车轮动位移等指标建立综合评价指标反馈给改进鲸鱼算法对控制器的参数进行实时整定. 为了验证该控制器的有效性, 本文建立了主动悬架系统仿真模型和被动悬架、两类典型的主动悬架进行了对比. 仿真结果表明, 本文提出的控制器能明显改善车辆平顺性, 提高车辆的平稳性和乘坐舒适性.

关键词 主动悬架, 鲸鱼优化算法, PID 控制, Simulink 仿真

中图分类号: U463.33

文献标志码: A

Active Suspension Control Strategy Based on Improved Whale Optimization Algorithm^{*}

Li Dengke^{1,2} Feng Jingjing^{1,2†} Wang Zhongyu^{1,2} Sun Ruiling^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Electromechanical System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(2. National Demonstration Center for Experimental Mechatronic Engineering Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract The parameter adaptive adjustment of automobile active suspension controller has always been a research hotspot in the field of automobile suspension control. In this paper, the whale optimization algorithm is selected as the parameter adjustment algorithm of the controller, and the improvement strategy of the algorithm is proposed. Based on this, a parameter self-tuning PID controller based on the improved whale optimization algorithm is designed. Based on the suspension dynamic deflection, body vertical acceleration and wheel dynamic displacement, the dimensionless evaluation index is built to feed back to the improved whale algorithm to adjust the controller parameters in real time. In order to verify the effectiveness of the controller, the simulation model of active suspension system is established and compared with different active suspension systems in transverse and longitudinal aspects. The simulation results show that the controller proposed in this paper can obviously improve the ride comfort, ride stability and ride comfort of the vehicle.

2024-03-22 收到第 1 稿, 2024-04-17 收到修改稿.

^{*} 天津理工大学创新创业计划性项目 (202210060090), Tianjin University of Technology Innovation and Entrepreneurship Project (202210060090).

[†] 通信作者 E-mail: jjfeng@tju.edu.cn

Key words active suspension, whale optimization algorithm, PID control, Simulink simulation

引言

主动悬架系统是汽车工程领域的重要创新,通过作动器主动干预,显著提升车辆操控性和乘坐舒适性.它可以优化车辆动态行为,减少车身颠簸,增加稳定性,实现安全性与舒适性的平衡^[1,2].悬架控制策略的研发是影响系统性能的关键,研究主动悬架控制策略对汽车悬架技术进步至关重要.

随着新能源汽车的发展,汽车主动悬架的研究已成为汽车领域的研究重点^[3].在研究主动悬架系统的控制策略方面总体经历了多个阶段,最初体现在采用不同的控制方法上.邵素娟和王策等^[2,4]分析了时滞反馈控制在主动悬架上的应用效果.宋刚等^[5]分析了鲁棒 H_2/H_∞ 控制器应用在主动悬架上的效果.李韶华等^[6]提出了一种主动悬架 T-S 模糊控制策略并分析了其控制效果.唐传茵等^[7]分析了模糊控制应用在主动悬架上的效果.Chen 等^[8]设计了一款上层模糊控制器和下层模型匹配控制器结合的控制结构.这些控制器均有效地提高了汽车运行地稳定性和平顺性.随后,现代智能算法被引入控制策略,进一步提高了系统的自适应能力和优化效率.詹长书和许力等^[9,10]运用了粒子群算法分别结合了 PID 控制器和分数阶 PID 控制器.吴振宇等^[11]运用遗传算法和 IAE 性能指标寻优整定分数阶 PID 控制器参数并应用于智能车被控系统.程振阳等^[12]则引入 BP 神经网络控制.在各类控制器上,PID 控制器结合智能算法的控制策略凭借其高效、易调节的特点被广泛采用,但智能算法和 PID 的兼容性和整体性能仍有待改善.

鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA),凭借其鲁棒性强、参数调节灵活且适用范围广的特点^[13],引起了广泛关注.尽管如此,WOA 存在受初始种群分布影响强、收敛速度慢、局部搜索能力弱等缺点,学者们也相继展开了改进策略研究^[14].Ling 等^[15]提出了引入 levy 飞行策略来增强全局搜索能力.杨炳媛等^[16]采用自适应选择策略以提升局部搜索效率.康文文等^[17]证明了改进后的 WOA 相比于遗传算法和蚁群算法在无人车路径优化上的优越性.尽管如此,现有文献针对 WOA 在复杂环境下主动悬架系统的适用

性方面的研究仍然不足.

为进一步改善汽车主动悬架系统的性能,并验证 WOA 应用在汽车主动悬架的优势,本文计划通过改进鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA)来快速、准确地对主动悬架控制器参数进行自适应调整.针对仿真系统,本文结合悬架动挠度、车轮垂向位移和车身垂向加速度的均方根及其仿真最大值设计综合评价指标,对比分析了被动悬架、采用粒子群算法、WOA 和 IWOA 的主动悬架控制策略.通过这项研究,验证了改进鲸鱼优化算法可以通过动态优化控制器的相关参数改善主动悬架系统的整体性能,提升车辆的稳定性和乘客的舒适性.

1 1/4 主动悬架仿真模型

1.1 1/4 主动悬架仿真模型

1/4 车辆的主动悬架仿真模型如图 1 所示.图中, m_b 为簧载质量, m_t 为非簧载质量, x_b 为车身垂向位移, x_t 为车胎垂向位移; x_0 为路面激励信号即车辆垂向位移, f 为主动悬架作动力, k_t 为轮胎刚度, k_s 为悬架刚度, c_b 为悬架阻尼.根据牛顿运动定律,建立汽车主动悬架的运动微分方程为:

$$m_b \ddot{x}_b = f - c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_t) - k_b(x_b - x_t) \quad (1)$$

$$m_t \ddot{x}_t = c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_t) + k_t(x_0 - x_t) + k_b(x_b - x_t) - f \quad (2)$$

式中, $\ddot{x}_b$ 为车身垂向加速度, $\dot{x}_b$ 为车身垂向速度, $\ddot{x}_t$ 为车胎垂向加速度, $\dot{x}_t$ 为车胎垂向速度.根据式(1)、式(2)将系统状态空间输入设置为路面激励 x_0 及作动力 f , 输出设置为车身位移、车身速度、轮胎

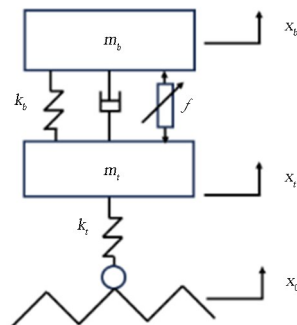


图 1 1/4 车辆主动悬架模型

Fig. 1 1/4 Vehicle active suspension model

位移和轮胎速度,可得主动悬架的状态空间方程:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_b/m_b & -c_b/m_b & -k_t/m_t & -c_t/m_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_b/m_t & c_b/m_t & -(k_b+k_t)/m_t & -c_b/m_t \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/m_b & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/m_t & k_t/m_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_b/m_b & c_b/m_b & k_b/m_b & c_b/m_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/m_b & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

至此,即可以在 SIMULINK 中通过 State-Space 模块构建的 1/4 主动悬架仿真模型。

1.2 路面激励信号的确定

路面激励信号可根据国标 GB7086 设定. 参考殷珩^[18]等提出的路面激励仿真方法,路面激励信号的时域模型可由以下式定义:

$$\dot{\mathbf{x}}_0(t) = -2\pi n_1 \mathbf{v} \mathbf{x}_0(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} \mathbf{v} \mathbf{w}(t) \quad (7)$$

式中, $\dot{\mathbf{x}}_0(t)$ 为路面激励信号振动加速度, $\mathbf{v}$ 为车辆运动速度, $\mathbf{w}(t)$ 为单边功率谱下限带白噪声功率谱密度为 1 的高斯白噪声输入; n_1 是路面不平度的下截至频率,这里取 0.01m^{-1} , 对应最大的路面振幅为 100m ; n_0 为路面功率谱密度参考空间频率,这里取 0.1m^{-1} . 路面不平系数 $G_q(n_0)$ 可通过查询国标获取。

值得注意的是,在 SIMULINK 模块建立仿真模型时,应将仿真步长设置为 $1/10\text{vs}$, 以此保证在当行驶速度不同时,每行驶 1m 有 10 个采样点;同时将仿真时间设置为 X/vs , 这里 X 为预设行驶路面路径长度, 以此保证仿真总路径长度一定。

1.3 PID 控制器在主动悬架上的应用

PID 控制器因其稳定、高效的性能常被应用于各类主动悬架^[11]. 改进鲸鱼优化算法 PID 主动悬

架控制结构如图 2 所示. $e(t)$ 为目标车身加速度值与目标的差值. 通过对 $e(t)$ 进行比例、积分、微分运算,将运算后的结果作为主动悬架的作动力传递给 1/4 车辆主动悬架模型. 其中, PID 控制的微分方程为:

$$f = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

式中, K_p 是比例增益 K_i 为积分增益 K_d 微分增益 f 为 PID 控制器传递给 1/4 车辆主动悬架模型的作动力. 车身加速度与乘坐舒适性直接相关,故而将车身加速度作为反馈给 PID 控制器的信息^[9,10].

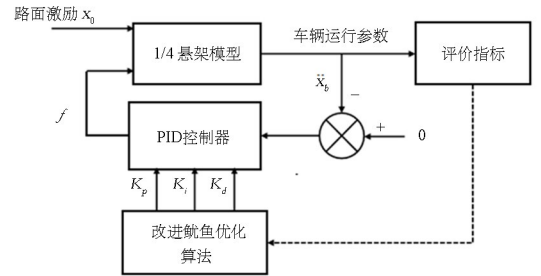


图 2 IWOA-PID 主动悬架系统结构图
Fig. 2 Structure of IWOA-PID Active Suspension System

2 鲸鱼优化算法及改进策略

WOA 以座头鲸的三种捕猎行为进行建模^[13]. 本文通过优化初始解空间、分段控制参数和自适应权值以及引入随机个体更新等策略改进算法性能。

2.1 优化初始解空间

初始解空间的有序分布可以提高算法的收敛速度,这里引入 sine 混沌序列. 公式如下:

$$x_{i+1}^d = u \times \sin(\pi \times x_i^d) \quad (9)$$

式中, u 为混沌序列的调整参数, u 的取值为 0.99 .

2.2 改进包围捕猎方式

包围捕猎方式中,鲸鱼个体的位置更新公式如式(9)和式(10)所示:

$$x_i^d(k+1) = x_p^d(k) - A \times D_{1,i}^d \quad (10)$$

$$D_{1,i}^d = |C \times x_p^d(k) - x_i^d(k)| \quad (11)$$

式中, x_i^d 表示鲸鱼位置, $D_{1,i}^d$ 是在包围捕猎阶段鲸鱼位置更新参数值, k 表示当前迭代次数, A 、 C 是鲸鱼种群更新逻辑的距离参数,由式(12)、式(13)定义:

$$A = 2ar_1 - a \quad (12)$$

$$C = 2r_2 \quad (13)$$

式中, r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 内的随机数. 文中用分段函数和正弦表达式改善参数 a 的线性关系以更好的平衡种群捕猎策略, 它可以表示为,

$$a = \begin{cases} 2 - \sin\left(\pi \times \frac{k}{T}\right), & k \leq 0.5T \\ \sin\left(\pi \times \frac{k}{T}\right), & k > 0.5T \end{cases} \quad (14)$$

式中, T 为最大迭代次数. 从式 (14) 可知, 参数 a 的取值范围为 $[0, 2]$. 由此, 结合式 (12) 推得 $|A| \leq 2$. 在包围捕猎阶段, $|A| \leq 1$.

2.3 改进随机捕猎模式

猎物随机狩猎时数学模型如式 (15) 和式 (16) 所示:

$$x_i^d(k+1) = x_{rand}^d(k) - A \times D_{2,i}^d \quad (15)$$

$$D_{2,i}^d = |C \times x_{rand}^d(k) - x_i^d(k)| \quad (16)$$

式中, x_{rand}^d 是鲸鱼种群向探索空间狩猎的随机个体在第 d 维空间的位置坐标, $D_{2,i}^d$ 是在随机捕猎阶段鲸鱼的位置更新参数值.

在算法原有随机捕猎阶段个体更新策略的算法的基础上, 在算法迭代的中前期引入非线性收敛因子 w_1 , 加速算法整体的收敛能力. 在算法的中后期引入非线性个体位置摄动因子 w_2 , 避免算法陷入局部最优解. w_1 和 w_2 的表达式如下:

$$w_1 = 1 - \cos\left(\frac{k}{T} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (17)$$

$$w_2 = \sin\left(\frac{k}{T} \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (18)$$

改进后, 捕猎阶段的个体位置更新如下式:

$$\begin{cases} x_i^d(k+1) = [x_{rand}^d(k) - A \times D_{2,i}^d] \times w_1, & k \leq 0.5T \\ x_i^d(k+1) = [x_{rand}^d(k) - A \times D_{2,i}^d] \times (1 + w_2), & k > 0.5T \end{cases} \quad (19)$$

同时, 引入突变抑制策略. 其表达式如下:

$$x_i = x_{best} \times rand, k^2 \cdot J(x_{best}) \cap k > 0.5T \quad (20)$$

式中, x_i 为个体的位置坐标; x_{best} 为最优个体的位置坐标; $J(x_i)$ 代表个体的评价指标函数适应度值.

2.4 气泡网螺旋捕猎方式

设定选择气泡网螺旋捕猎方式的概率是 p , 则选择包围或随机方式的概率是 $1 - p$. 式 (21) 为鲸

鱼螺旋捕猎方式的运动模型, 式 (22) ~ (24) 为式 (21) 中参数表达式:

$$x_i^d(k+1) = x_p^d(k) + D_{3,i}^d \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) \quad (21)$$

$$l = 1 + (q - 1) \times rand \quad (22)$$

$$q = -1 - \frac{k}{T} \quad (23)$$

$$D_{3,i}^d = |x_p^d(k) - x_i^d(k)| \quad (24)$$

式中, l 由自适应因子 q 定义, q 的取值与迭代次数呈负相关, b 为常数, 通常取值为 1, l, b 都是用于定义对数螺旋运动的形状参数. p 取值为 0.5.

3 算法性能测试及结果分析

本文选取了六个常用的算法测试算力函数来测试算法的各项性能. Ackley、Rastrigin 函数用来检验算法的全局搜索能力, Rosenbrock、Michalewicz 函数用来检验算法的局部搜索能力, Sphere 函数用来检验算法的收敛速度, Griewank 函数用来评价算法全局与局部搜索能力之间的平衡性能. 具体函数表达式和相关参数设定可查询文献[19]. 上述函数的维度都设置为 30, 最小值为 0. 函数自变量取值范围均为该函数标准取值范围, 各函数均

表 1 测试函数迭代数据

Table 1 The test function iterates the data

函数	指标	PSO	WOA	IWOA
Ackley	Min	4.56E+00	3.08E-05	8.88E-16
	Max	1.42E+01	2.02E-02	8.88E-16
	Meam	8.92E+00	1.54E-03	8.88E-16
	Std	9.07E+00	2.42E-03	8.88E-16
Rastrigin	Min	107.6655	7.99E-09	0
	Max	4.68E+02	5.40E+02	0.00E+00
	Mean	2.74E+02	1.86E+01	0.00E+00
	Std	2.82E+02	6.22E+01	0.00E+00
Rosenbrock	Min	135.6725	28.4865	28.4854
	Max	8262.4946	2.89E+01	30.4566
	Mean	992.7907	2.88E+01	28.7209
	Std	1291.9168	2.88E+01	28.7209
Michalewicz	Min	-1.94E+01	-1.64E+01	-1.34E+01
	Max	-2.3788	-1.42005	-1.31E+00
	Mean	-9.7537	-8.8260	-7.74E+00
	Std	10.0786	9.2194	8.10E+00
Sphere	Min	6.46E-01	2.37E-09	0.00E+00
	Max	1.72E+01	1.51E-05	0.00E+00
	Mean	3.92E+00	1.42E-07	0.00E+00
	Std	4.54E+00	3.33E-07	0.00E+00
Griewank	Min	2.7536	9.76E-08	0
	Max	5.34E+01	1.01E+00	0
	Mean	1.36E+01	7.89E-02	0
	Std	1.56E+01	2.65E-01	0

收敛于 0. 将本文提出的 IWOA 算法与 PSO 算法和 WOA 算法进行综合测试对比验证 IWOA 算法的性能. PSO 算法中, 取 $c_1=c_2=2$, w 的取值随算法迭代从 0.9 线性缩减到 0.2^[6]. 实验硬件采用 AMD Ryzen 7 4800H 16GB 的笔记本电脑, 将各种群算法的种群数量设置为 50, 最大迭代次数设置为 50, 每个算法独立运行 100 次取各评价参数的平均值. 实验结果如表 1 所示. 表中, 表中的 Min、Max、Mean、Std 分别为仿真时间内函数最后一次迭代的相应参数的最小值、最大值、平均值、标准差在 100 次运行结果中的平均数.

通过分析表 1 所显示的各项数据, 相比于 PSO 这类传统算法, WOA 算法全局、局部搜索能力和收敛速度均有较大改善. 而 IWOA 相比于 WOA, 除一项函数的一项性能指标数据外, 各项数据均优于 WOA.

4 模拟仿真

这里将 PSO、WOA、IWOA 结合 Smith-PID 控制器与 1/4 主动悬架模型进行联合仿真分析.

4.1 选择评价指标和多目标函数

本文设计了一个针对主动悬架的无量纲评价指标, 评价指标表达式为:

$$J = k_1 \left[k_{11} \frac{\text{RMS}(\ddot{x}_b)}{\text{RMS}(\ddot{x}_{b1})} + k_{12} \frac{\text{Max}(\ddot{x}_b)}{\text{Max}(\ddot{x}_{b1})} \right] +$$
$$k_2 \left[k_{21} \frac{\text{RMS}(x_b - x_t)}{\text{RMS}(x_{b1} - x_{t1})} + k_{22} \frac{\text{Max}(x_b - x_t)}{\text{Max}(x_{b1} - x_{t1})} \right] +$$
$$k_3 \left[k_{31} \frac{\text{RMS}(x_t - x_0)}{\text{RMS}(x_{t1} - x_0)} + k_{32} \frac{\text{Max}(x_t - x_0)}{\text{Max}(x_{t1} - x_0)} \right]$$

(25)

式中, RMS 表示在仿真时间下的相应指标的均方根, Max 表示在仿真时间内相应指标的最大值. 对于汽车平顺性来说, 影响最大的是车身加速度, 悬架动挠度和轮胎动行程也对平顺性有一定的影响. 一般对于平顺性的研究基于降低车身加速度, 主要在于均方根值的大小. 同时, 为了提高模型鲁棒性, 加入了对于仿真时间峰值的考虑因素. 由汽车平顺性的各评价参数为切入点, 以各参数对驾驶员驾驶车辆的主观感受为参考^[9,10], 综合构建了一个无量纲指标, 取 $k_1=0.7, k_2=0.2, k_3=0.1$. 同时, 为衡量均方根和最大值对各评价参数值的影响, 这里统一取 $k_{n1}=0.8, k_{n2}=0.2$.

4.2 悬架仿真流程

IWOA-PID 主动悬架仿真流程图如图 3 所示.

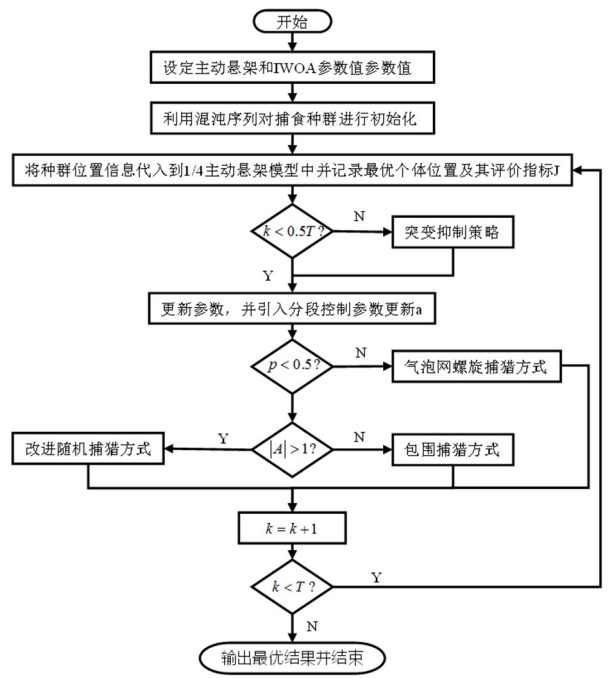


图 3 仿真流程图
Fig. 3 Simulation flow chart

表 2 悬架参数
Table 2 Suspension parameter

参数	数值
M_b/kg	370
M_t/kg	40
$k_b/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	18 700
$k_t/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	19 500
$c_b/[(\text{N}\cdot\text{s})^{-1}]$	1480

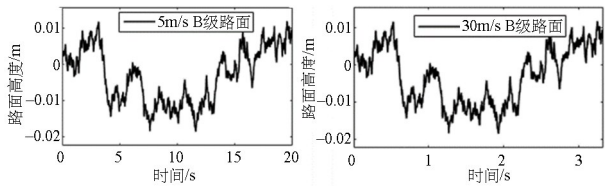


图 4 B 级路面激励信号
Fig. 4 B-class road surface excitation

悬架系统参数如表 2 所示. IWOA-主动悬架迭代具体参数如下: 设定迭代次数 $T=20$, 种群数量设置为 $S=30$, PID 控制器的三个参数的取值范围为 $K_p \in (-100, 100), K_i \in (-100, 100), K_d \in (-1, 1)$. 基于 Smith-PID 控制器控制逻辑, 设置延迟为仿真时间的一个步长, 以防止代数环. 基于上文在路面激励定义时给出的方法, 步长大小为车辆

行驶 1m 所用的具体时间. 经实验,延迟控制器对实验结果的影响较小. 为模拟作动器,将输出范围设置为 ± 5000 . 分别输入车速为 $v=5\text{m/s}$ 和 $v=30\text{m/s}$ 的 B 级路面激励信号,其时域曲线如图 4 所示.

4.3 仿真结果分析

在 MATLAB 中运行主程序,得到两种控制器的 1/4 主动悬架评价指标收敛曲线如图 5 所示. 鲸鱼位置更新的单次迭代时间 IWOA 为 5s, 会受实验设备性能和仿真软件版本兼容性有所变化. IWOA 迭代时间稍快于 WOA,同时由图 5 可看出 IWOA 收敛效果更好.

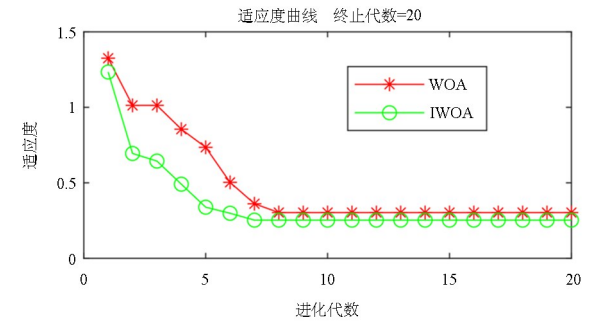


图 5 主动悬架评价指标收敛曲线
Fig. 5 Convergence curve of active suspension evaluation index

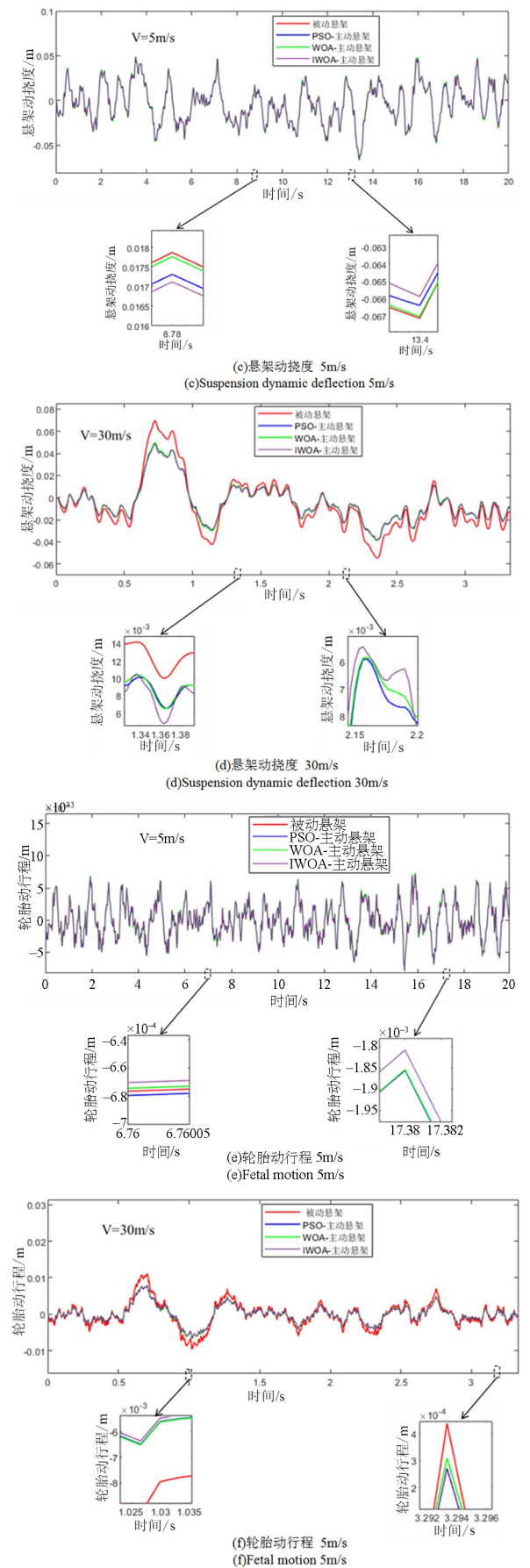
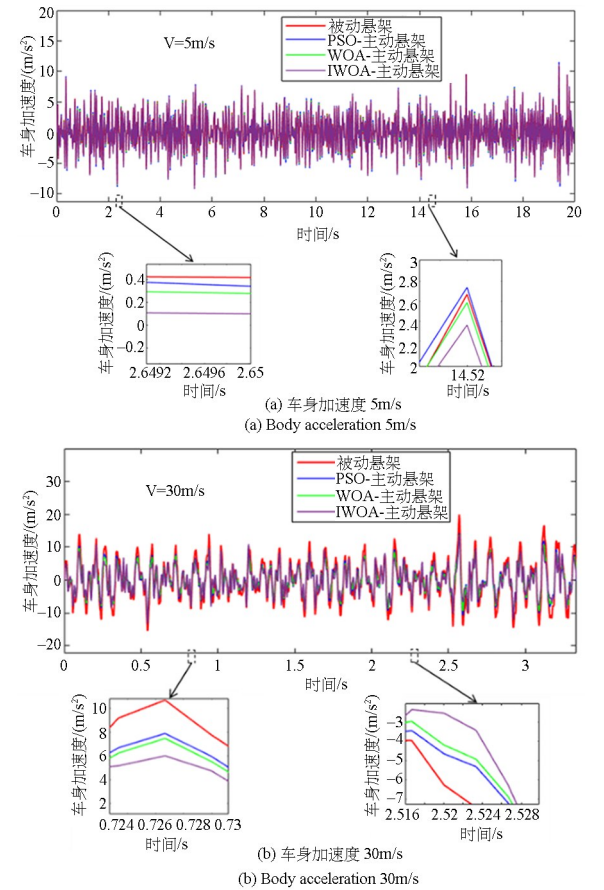


图 6 悬架仿真时域曲线图
Fig. 6 Time domain diagram of suspension simulation

将迭代完成的最优鲸鱼个体位置信息作为参数在1/4主动悬架模型上进行仿真分析,得到 PSO、WOA、IWOA 三种主动悬架和被动悬架在 30m/s 与 5m/s B 级路面激励下的三种主动悬架的车身垂向加速度、悬架动挠度和轮胎动行程时域图,其性能指标对比如图 6 所示。

在各个评价指标下,IWOA 主动悬架曲线整体包络另外两种悬架曲线,说明 IWOA 主动悬架在各项性能指标方面均有提升.以 30m/s 路面激励信号下的各种悬架的性能指标具体数据为例,通过表 3 可以更详细地分析对比三种悬架各项性能数据.表 3 记录了在 30m/s 路面激励信号下多种悬架控制器的各指标的均方根和仿真时间中的最大值.经实验验证,其余车况下悬架性能指标数据性能近似,IWOA—主动悬架优于其他三种悬架。

相比于被动悬架,IWOA—主动悬架在悬架动挠度、车胎动行程和车身加速度的均方根方面改善了 9.07%到 99.98%;在悬架动挠度、车胎动行程和车身加速度的最大值方面减少了 29.52%到 31.83%。对于不同的驾驶速度也具有良好的适应性.总的来说,IWOA—主动悬架都在乘坐舒适性和驾驶平顺性方面有较大的提升。

表 3 三种悬架性能指标对比

Table 3 Comparison of three suspension performance indexes

参数	被动悬架	PSO— 主动悬架	WOA— 主动悬架	IWOA— 主动悬架
$RMS(x_b-x_t)$	0.000 988	0.000 855	0.000 758	0.000 602
$Max(x_b-x_t)$	0.164 889	0.115 463	0.116 515	0.116 221
$RMS(x_t-x_0)$	0.001 298	0.000 881	0.000 895	0.000 869
$Max(x_t-x_0)$	0.025 250	0.179 439	0.017 902	0.017 756
$RMS(x_b)$	1.692 204	0.561 267	0.000 430	0.000 135
$Max(x_b)$	48.304 786	35.252 81	34.164 748	32.929 05

5 结论

本研究通过对 WOA 进行改进,使 IWOA 对 PID 控制器参数进行自适应调整,验证了 IWOA 应用在主动悬架控制器算法方面的优越性.改进后的 IWOA 在收敛速度、全局和局部搜索能力方面优于传统智能群算法以及 WOA.本文通过设计一个针对主动悬架的无量纲评价指标提供给 IWOA 进行迭代,针对多种仿真路面情况,显著改善了主动悬架的车身加速度、悬架动挠度和车胎动位移等

汽车主动悬架平顺性指标.IWOA 作为新型高效算法,为汽车主动悬架的未来进一步优化提供了有效途径。

参考文献

[1] SANDE T P J, GYSEN B L J, BESSELINK I J M, et al. Robust control of a direct-drive electromagnetic active suspension system [C]// Linear Drives for Industry Applications (LDIA11). [S. l. : s. n.] 2011.

[2] 邵素娟,任传波,荆栋,等.具有时滞反馈控制的非线性主动悬架系统的稳定性、分岔和混沌[J].振动与冲击,2021,40(7):281—290.

SHAO S J, REN C B, JING D, et al. Stability, bifurcation and chaos of nonlinear active suspension system with time delay feedback control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 281—290. (in Chinese)

[3] 李韶华,王伟达.车辆动力学与控制研究进展[J].动力学与控制学报,2021,19(03):1—4.

LI S H, WANG W D. Research progress on vehicle dynamics and control [J]. Journal of Dynamics and Control. 2021, 19(03): 1—4. (in Chinese)

[4] 王策,罗晓亮,张洋瑞.含时滞的半主动悬架系统稳定性时频分析[J].汽车工程师,2023(8):21—29.

WANG C, LUO X L, ZHANG Y R. Time-frequency stability analysis of semi-active suspension system [J]. Automotive Engineer, 2023(8): 21—29. (in Chinese)

[5] 宋刚,林家浩,吴志刚.考虑参数不确定性的主动悬架鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制[J].动力学与控制学报,2008,6(2):156—164.

SONG G, LIN J H, WU Z G. Robust H_2/H_∞ control of active vehicle suspension subjected to parameter uncertainties [J]. Journal of Dynamics and Control, 2008, 6(2): 156—164. (in Chinese)

[6] 唐传茵,马岩,赵广耀,等.基于模糊控制策略的车辆主动悬架研究[J].动力学与控制学报,2015,13(3):210—214.

TANG C Y, MA Y, ZHAO G Y, et al. Application of fuzzy logic algorithm on active suspension control of vehicle [J]. Journal of Dynamics and Control, 2015, 13(3): 210—214. (in Chinese)

[7] 李韶华,张培强,冯桂珍,等.分布式驱动电动汽

- 车主动悬架 T-S 模糊控制研究[J]. 力学与实践, 2023, 45(1): 22—32.
- LI S H, ZHANG P Q, FENG G Z, et al. T-S fuzzy control for active suspension of distributed drive electric vehicle [J]. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(1): 22—32. (in Chinese)
- [8] CHEN X W, ZHOU Y, ZHANG J G, et al. A synergistic strategy of automobile intelligent cruise system based on fuzzy control adopting hierarchical structure [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(5): 1—13.
- [9] 詹长书, 苏立庆. 基于粒子群优化的主动悬架 PID 控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4180—4186.
- ZHAN C S, SU L Q. PID control strategy of active suspension based on particle swarm optimization [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(10): 4180—4186. (in Chinese)
- [10] 许力, 曹青松, 张定军. 基于量子粒子群算法的主动悬架分数阶控制策略[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 227—233.
- XU L, CAO Q S, ZHANG D J. Fractional order control strategy of active suspension based on QPSO [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(16): 227—233. (in Chinese)
- [11] 吴振宇, 赵亮, 冯林. 基于分数阶 PID 控制器的智能车控制[J]. 控制工程, 2011, 18(3): 401—404.
- WU Z Y, ZHAO L, FENG L. Control of intelligent vehicle based on fractional order PID [J]. *Control Engineering of China*, 2011, 18(3): 401—404. (in Chinese)
- [12] 程振扬, 杨明, 吴心杰, 等. 基于 BP 神经网络 PID 控制的主动悬架仿真分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(2): 130—134.
- CHENG Z Y, YANG M, WU X J, et al. Simulation and analysis of active suspension based on BP neural network PID control [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2022, 60(2): 130—134. (in Chinese)
- [13] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51—67.
- [14] NADIMI-SHAHRABI M H, ZAMANI H, ASGHARI VARZANEH Z, et al. A systematic review of the whale optimization algorithm: theoretical foundation, improvements, and hybridizations [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(7): 4113—4159.
- [15] LING Y, ZHOU Y Q, LUO Q F. Lévy flight trajectory-based whale optimization algorithm for global optimization [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 6168—6186.
- [16] 杨炳媛, 袁杰, 郭园园. 一种自适应鲸鱼快速优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(1): 145—153.
- YANG B Y, YUAN J, GUO Y Y. An adaptive fast whale optimization algorithm [J]. *Computer Engineering & Science*, 2023, 45(1): 145—153. (in Chinese)
- [17] 康文文, 桂海霞. 基于改进鲸鱼算法的无人车应急物资配送路径优化[J]. 湖北民族大学学报: 自然科学版, 2023, 41(2): 266—274.
- KANG W W, GUI H X. Optimization of emergency material distribution path for unmanned vehicles based on improved whale algorithm [J]. *Journal of Hubei University for Nationalities: Natural Science Edition*, 2023, 41(2): 266—274. (in Chinese)
- [18] 殷珺, 陈辛波, 吴利鑫, 等. 滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45(3): 398—407.
- YIN J, CHEN X B, WU L X, et al. Simulation method of road excitation in time domain using filtered white noise and dynamic analysis of suspension [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2017, 45(3): 398—407. (in Chinese)
- [19] 张天瑞, 刘悦. 基于 ISSA 和 IA~* 的 AGV 集成作业调度及其路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(2): 186—192.
- ZHANG T R, LIU Y. Research on AGV integrated job scheduling and its path planning based on ISSA and IA [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024(2): 186—192. (in Chinese)