

基于改进人工蜂群算法优化的汽车主动悬架 PID 控制

荆航, 续彦芳

(中北大学 能源与动力工程学院, 山西 太原 030051)

摘要:针对汽车主动悬架 PID 控制器参数整定需依赖反复试验和丰富经验的问题,以 1/4 主动悬架为研究对象,以车身垂向加速度、悬架动行程和轮胎动位移为评价指标建立目标函数,设计一种基于搜索方式和选择策略改进的人工蜂群算法优化的主动悬架 PID 控制器。在 Simulink 环境下的仿真结果表明:相同 B 级路面条件下,改进后 ABC-PID 控制的 1/4 主动悬架 3 个性能指标相较于改进前分别优化了 15.1%、26.3%、15.4%。

关键词:汽车;主动悬架;人工蜂群算法;Simulink 仿真;参数整定

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)05-0232-04

Active Suspension PID Control Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm Optimization

JING Hang, XU Yanfang

(School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the dependence on repeated trials and enormous experiences by PID controller parameter tuning, taking 1/4 active suspension as the research object, establishes the objective function based on the evaluation indicators of body vertical acceleration, suspension dynamic stroke and tire dynamic displacement, and designs an active suspension PID controller optimized by artificial swarm algorithm based on the improvement of search method and selection strategy. The simulation results in the Simulink environment show that under the same B-class pavement conditions, the three performance indicators of the improved ABC-PID-controlled 1/4 active suspension are optimized by 15.1%, 26.3% and 15.4% respectively compared with the previous improvement.

Keywords: vehicle; active suspension; artificial swarm algorithm; Simulink simulation; parameter tuning

0 引言

主动悬架的概念最早由美国通用公司在 20 世纪 60 年代提出。主动悬架由传感器、控制器、执行机构、作动器和被动悬架构成一个有源闭环控制系统^[1]。由安装在车身上不同位置的传感器采集加速度或力或电位信号来获取车身姿态,控制器根据控制策略输出主动控制力,执行机构将力传递给相应部件来调节车身姿态。主动悬架技术开发的核心在控制策略上。PID 控制、Skyhook 控制、线性二次型最优控制、滑模变结构控制、鲁棒控制等经典和现代控制理论都较为成熟,随着人工智能时代的到来,模糊控制、专家控制、预测控制及神经网络控制等智能控制理论蓬勃发展,在主动悬架控制算法上的应用也日益增多^[2]。

PID 控制是一种线性反馈控制方法,它是以系统输出和输入的偏差为控制信号,经由比例、积分、微分 3 种运算叠加,得到稳定、快速、准确地响应,从而对被控对象实施控制。PID 控制算法中 P、I、D 这 3 项在信号转换过程中分别对应着超前校正、滞后校正、滞后-超前校正,3 个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的选取至关重要。然而,传统的 PID 控制器参

数整定方法有 Ziegler-Nichols 方法、Cohen-Coon 方法等,需要长时间的经验积累和繁杂的试验调试,设计周期长,耗资大^[3]。人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 由自然界蜂群采蜜行为得到启发,模拟蜜蜂寻找蜜源、采蜜以及信息传递的过程,更出色地完成局部寻优,最终实现全局最优搜索,在解决多变量函数优化问题有着广泛的应用且被多数学者关注与研究^[4]。本文采用此算法并对其进行改进,实现 PID 控制器参数自整定,通过 MATLAB 仿真,选取合适的性能指标,对比一般 PID 控制和改进前,验证了 ABC-PID 控制主动悬架优化的有效性。

1 悬架系统模型建立

为了方便研究,选取二自由度 1/4 车辆主动悬架为研究对象,如图 1 所示。由牛顿运动定律,建立主动悬架的数学模型:

$$m_u \ddot{z}_u - c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_s (z_s - z_u) + k_t (z_u - z_0) + u = 0 \quad (1)$$

$$m_s \ddot{z}_s + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) - k_s (z_s - z_u) - u = 0 \quad (2)$$

式中: m_u 为非簧载质量, kg; m_s 为簧载质量, kg; c_s 为悬架阻尼, N · s/m; k_s 为悬架刚度, N/m; k_t 为轮胎等效刚度, N/m;

第一作者简介:荆航(1998—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为主动悬架智能控制,2356159524@qq.com。

z_u 为轮胎垂直位移,m; z_s 为车身位移,m; z_0 为路面位移,m; u 为主动控制力,N。

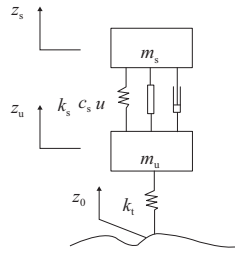


图1 1/4主动悬架系统模型

采用滤波白噪声法模拟路面激励:

$$z_0(t) = -2\pi f_0 z_0(t) + 2\pi \sqrt{G_q(n_0)} v q(t) \quad (3)$$

式中: f_0 为下截止频率,Hz; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数, m^2/m^{-1} ; v 为车速,m/s; $q(t)$ 为数学期望为零的高斯白噪声。常见路面为B、C级路面,本文选取C级路面模型为汽车行驶过程中所受的随机扰动,路面不平度系数为 $G_q(n_0) = 256 \times 10^{-6} m^2/m^{-1}$,车速 $v = 20 m/s$,参考空间频率 $n_0 = 0.1 m^{-1}$,系统仿真时间设定为10s。由式(2),在MATLAB/Simulink平台搭建的白噪声随机路面输入仿真模型如图2所示。

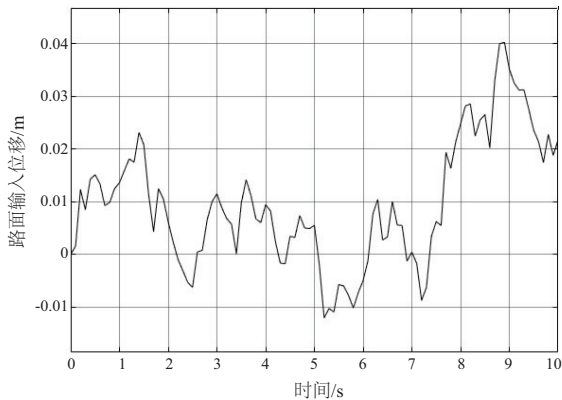


图2 C级路面输入位移仿真结果

2 主动悬架PID控制器设计

PID控制是由系统的实际输出值 $y(t)$ 与给定的一个值 $r(t)$ 构成偏差 $e(t) = y(t) - r(t)$,经过比例、积分、微分3种运算线性组合,得到主动控制力 $u(t)$ 输入给被控系统^[5]。PID控制的微分方程为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

式中: $u(t)$ 为控制系统的输出信号; $e(t)$ 为控制系统的偏差; K_p 为比例系数; T_i 、 T_d 分别为积分时间和微分时间。积分系数 $K_i = K_p/T_i$,微分系数 $K_d = K_p T_d$ 。

在MATLAB/Simulink环境下搭建的1/4主动悬架PID控制系统仿真模型如图3所示。

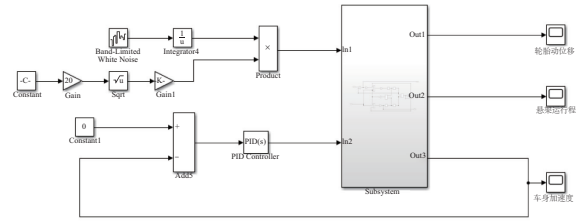


图3 1/4主动悬架PID控制器仿真模型

3 改进ABC-PID主动悬架控制

3.1 标准ABC算法及其改进

人工蜂群算法最早在2005年由Karaboga团队提出,它的本质也是群智能算法的一种具体体现^[6]。与常用的遗传算法相比,ABC算法参数较少、复杂度低、不易陷入局部最优、收敛速度快、稳定性好。在ABC算法中,设定引领蜂的数量等于跟随蜂的数量,蜜源的位置代表可行解,蜜源的花粉数量代表解的适应度值。引领蜂寻找蜜源并与跟随蜂分享信息,跟随蜂根据轮盘赌策略选择蜜源开采,如果新解的适应度值比旧解高,就用新解代替旧解,否则保留旧解;当某个解经过最大更新次数而适应度值并未改进时,则放弃该蜜源,启动侦察蜂,随机产生一个新的蜜源,如此迭代,直至得到最优解。

标准人工蜂群算法主要分3个阶段:引领蜂阶段、跟随蜂阶段和侦察蜂阶段。

对ABC算法参数进行初始化,主要参数有蜜源数目 S_N 、单个蜜源允许更新的最大次数limit、最大迭代次数MaxIt和加速度系数 α 。初始时刻,随机产生 S_N 个蜜源,具体随机产生的某个可行解为

$$X_i^j = X_{\min}^j + \text{rand}(0,1)(X_{\max}^j - X_{\min}^j) \quad (5)$$

式中: $i \in \{1, 2, \dots, S_N\}$; $j \in \{1, 2, \dots, D\}$; X_i^j 表示第 i 个蜜源的 j 维; X_{\max}^j 、 X_{\min}^j 表示 j 维解空间的最大值和最小值; $\text{rand}(0,1)$ 表示0到1之间的随机数。

引领蜂和跟随蜂在当前位置向量附近邻域进行搜索新位置,更新蜜源位置的公式为

$$v_i^j = X_i^j + \varphi_i^j (X_i^j - X_k^j) \quad (6)$$

式中: $k \in \{1, 2, \dots, S_N\}$, X_k 表示初始蜜源的邻域范围,且 $k \neq i$; φ_i^j 是 $[-1, 1]$ 的随机数。得到新蜜源后,比较其适应度值,选择优者。

引领蜂通过摇摆舞的方式向跟随蜂传递信息,跟随蜂根据一定的选择策略进一步选择出较好的蜜源,根据式(6)在新的蜜源附近进行搜索,并作一定的边界处理。常用的选择策略为轮盘赌策略,也叫贪婪策略,其数学表达式为

$$p_i = \frac{f(X_i)}{\sum_{i=1}^{S_N} f(X_i)} \quad (7)$$

式中: $f(X_i)$ 表示第 i 个蜜源的含蜜量,即第 i 个可行解的适应度函数值; S_N 表示解的总个数。

在侦察蜂阶段,当某个解经过最大更新次数而适应度值并未改进时,则该蜜源被放弃,根据式(5)重新随机产生一个新蜜源,侦察蜂根据式(6)进行搜索。

本文提出一种标准 ABC 算法的改进方法。引领蜂和侦察蜂根据式(6)更新解,在算法开始的一段时间内,解的位置比较疏散,距最优解较远,用式(6)的搜索幅度也较大;在算法接近收敛的后期,解的位置较近,也愈接近最优解,用式(6)的搜索幅度也较小。但是存在一个弊端,当前解与搜索的新解相等时,便不再更新。为了更利于得到精确的解,在式中引入一个很小的微调算子 ε ,即

$$v_i^j = X_i^j + \varphi_i^j (X_i^j - X_k^j) + \varepsilon \quad (8)$$

式中 ε 表示在 0 附近邻域内极小的一个数。这个极小的微调算子只在当前解与搜索的新解相等时起作用,在算法接近收敛的后期可以提高迭代效率。

此外,轮盘赌方式的选择策略存在一个弊端,当某些解的适应度值很大或很小时,即各个解之间的差异较大,此时用轮盘赌策略选择出来的较优解不再具有代表性,种群失去多样性。因此,提出一种新的选择策略,其数学表达式为

$$P_i = 0.1 \times \frac{f(x_i)}{\max f(x_i)} + 0.9 \quad (9)$$

式中 $\max f(x_i)$ 表示所有解的适应度函数值中的最大值。

3.2 改进 ABC-PID 算法流程

1) 确定目标函数

ABC 算法的优化变量是 k_p 、 k_i 、 k_d 这 3 个参数,选取车身垂向加速度、悬架动行程、轮胎动位移作为悬架性能的评价指标,因此目标函数必须含有这 3 个变量。这 3 个指标的单位 and 量级各不相同,因此用这 3 个指标分别对应的主动悬架方均根值除以被动悬架方均根值再作和,即可得到目标函数:

$$\min Q(x) = \frac{A}{A_{CC}} + \frac{B}{S_{WS}} + \frac{C}{D_{TL}} \quad (10)$$

式中 $Q(x)$ 为目标函数; A 、 B 、 C 分别表示 ABC-PID 主动悬架车身垂向加速度、悬架动行程、轮胎动位移的方均根值; A_{CC} 、 S_{WS} 、 D_{TL} 分别表示被动悬架这 3 个指标的方均根值。

2) 确定适应度函数

在 ABC 算法中,蜜源的含蜜量代表了适应度值的大小,即适应度值越大,蜜源的位置越好,即越接近最优解。目标函数是求取最小值的问题,因此选择目标函数的倒数作为适应度函数:

$$f = \frac{1}{Q(x)} \quad (11)$$

综上所述,基于改进人工蜂群算法优化 PID 控制器参数流程如图 4 所示。

4 仿真分析

4.1 主动悬架仿真模型建立

本文所选 1/4 主动悬架仿真基本参数如表 1 所示。

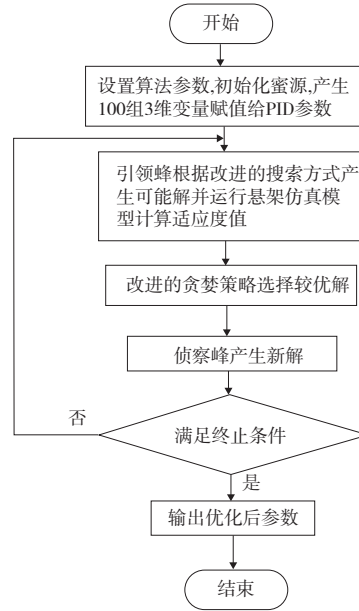


图 4 ABC 算法优化 PID 控制器参数流程

表 1 1/4 悬架仿真模型参数

车辆模型参数	符号/单位	数值
非簧载质量	m_u /kg	45
簧载质量	m_s /kg	320
轮胎等效刚度	k_t /(N/m)	200 000
悬架刚度	k_s /(N/m)	17 000
悬架阻尼	c_s /(N · s/m)	12 000
路面不平度系数	$G_q(n_0)$ /(m^2/m^{-1})	64×10^{-6}
下截止频率	f_0 /Hz	0.1

由式(1)和式(2)在 MATLAB/Simulink 中容易建立二自由度 1/4 车辆主动悬架模型,如图 5 所示。

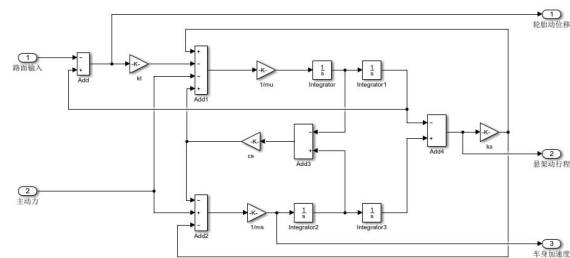


图 5 1/4 主动悬架仿真模型

4.2 改进 ABC-PID 主动悬架控制系统仿真

设定 PID 控制器参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的取值范围为 $[0, 500]$, 变量维度为 3 维,蜜源数目为 100,引领蜂、跟随蜂数目等于蜜源数目,加速度系数为 1,最大迭代次数为 100。

4.3 仿真结果分析

运行 Matlab 程序,迭代完成,经过优化后的 PID 控制器参数为: $k_p = 182.86$, $k_i = 497.26$, $k_d = 0.035$;改进前后的

ABC算法目标函数收敛曲线如图6所示;基于改进前后ABC算法优化的PID控制的主动悬架车身垂向加速度、悬架动行程、轮胎动位移响应对比图如图7所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

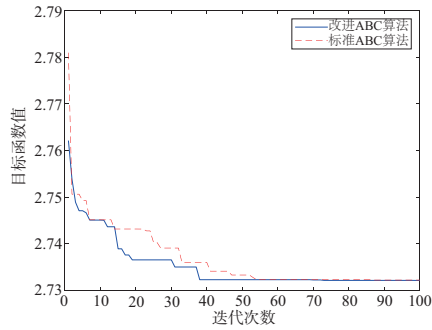


图6 目标函数收敛曲线

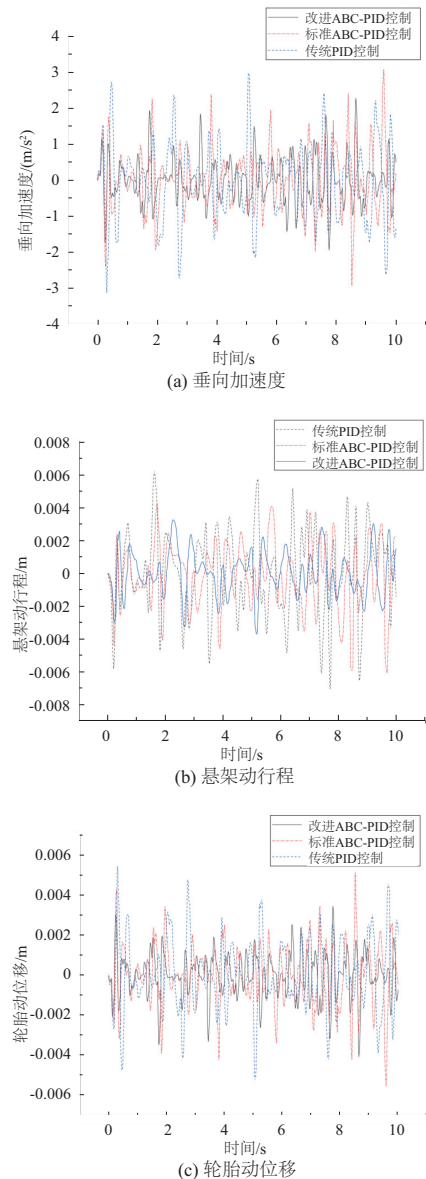


图7 改进前后系统输出响应对比

基于传统PID控制、标准ABC-PID控制、改进ABC-PID控制的1/4主动悬架车身垂向加速度、悬架动行程、轮胎动位移的方均根值如表2所示。

表2 仿真结果统计分析

评价指标	传统PID控制	标准ABC-PID控制	改进ABC-PID控制
垂向加速度/(m/s^2)	0.808 2	0.724 4	0.614 7
悬架动行程/m	0.002 6	0.001 9	0.001 4
轮胎动位移/m	0.001 5	0.001 3	0.001 1

从图6可以看出,改进ABC算法的目标函数不到40次就趋于收敛,目标函数值为2.7321,相比标准ABC算法收敛速度更快,且目标函数值更小。从表2可以看出,基于改进后的ABC-PID控制的1/4主动悬架的垂向加速度、悬架动行程、轮胎动位移相较于改进前分别优化了15.1%、26.3%、15.4%。仿真结果表明;基于搜索方式和选择策略改进的ABC算法优化主动悬架PID控制求解速度更快,得到的控制参数对于悬架性能也有明显的提升。

5 结语

传统PID控制器参数整定依赖丰富的经验和复杂的工程试验,同时具有一定的局限性,无法兼顾所有性能指标。本文基于搜索方式和选择策略改进的人工蜂群算法实现PID参数自整定,能有效减小其局限性,在有效控制主要指标垂向加速度的同时,也能使悬架动行程的缺陷得到弥补。在C级路面条件下,与传统PID控制、标准ABC-PID控制主动悬架相比,改进ABC-PID控制的主动悬架能有效改善车辆行驶平顺性和操纵稳定性,使悬架综合性能得到提升。

参考文献:

- [1] 曾繁鑫,郑敏毅,刘军,等. 半主动液压互联悬架客车的平顺性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(3):309-315.
- [2] 郭建辉. 基于Carsim的整车半主动悬架控制策略仿真研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- [3] 袁春元,蔡锦康,王新彦. 基于粒子群算法的车辆悬架PID控制器研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(5):91-97.
- [4] 黄帅,柳凯,党建军,等. 改进人工蜂群算法在谐振子参数优化中的应用[J]. 自动化与仪表,2021,36(11):96-99,102.
- [5] 邱巧迪,徐世许,张鸚琦,等. 基于二自由度PID前馈解耦的恒温恒湿控制系统设计[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):187-190.
- [6] VEČEK N, LIU S H, ČREPINŠEK M, et al. On the importance of the artificial bee colony control parameter limit[J]. Information Technology and Control,2017,46(4):566-604.

收稿日期:2022-03-01