

基于改进粒子群算法优化PID控制的主动悬架性能研究

张昕, 彭瑞祥, 张宏远

(沈阳理工大学 汽车与交通学院, 沈阳 110159)

摘要: 针对二自由度主动悬架比例-积分-微分(PID)控制器参数整定问题, 引入粒子群算法, 借助粒子群算法的全局搜索能力解决PID控制器参数整定问题, 考虑到传统粒子群算法收敛速度较慢, 设计了一种改进粒子群算法, 根据悬架性能评价指标建立目标函数, 分别模拟了随机路面激励输入和减速带式梯形冲击路面激励输入, 并验证了基于改进粒子群算法优化的PID控制器的有效性。仿真结果表明: 改进粒子群算法后目标函数的收敛速度明显提高; 基于改进粒子群算法优化PID控制的主动悬架在不同激励输入条件下均具有较好的行驶平顺性; 验证了改进粒子群算法的有效性并解决了PID控制器参数整定问题。

关键词: 主动悬架; 粒子群优化算法; PID; 平顺性; 仿真

中图分类号: U463

文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.06.003

Research on Active Suspension Performance Based on Improved Particle Swarm Algorithm Optimized PID Control

ZHANG Xin, PENG Ruixiang, ZHANG Hongyuan

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: A particle swarm algorithm is introduced for the parameter adjustment problem of 2-degree-of-freedom active suspension proportional-integral-derivative (PID) controller, and the parameter adjustment problem of PID controller is solved by the global search ability of particle swarm algorithm. The objective function is established according to the evaluation index of the suspension performance, and the random road excitation input and the speed bump trapezoidal impact road excitation input are simulated and the effectiveness of the PID controller optimized based on the improved particle swarm algorithm is verified. The simulation results show that the convergence speed of the objective function is significantly improved after the particle swarm algorithm is improved, and the active suspension with optimized PID control based on the improved particle swarm algorithm has better handling smoothness under different excitation input conditions, thus verifying the effectiveness of the improved particle swarm algorithm and solving the parameter tuning problem of the PID controller.

Key words: active suspension; particle swarm optimization algorithm; PID; smoothness; simulation

悬架系统是车辆的重要组成部分,可以通过其减振器传递和吸收来自路面激励作用在悬架系统上的力来降低车体的振动^[1]。主动悬架可以根据道路条件的变化,通过作动器输出主动控制力来改善车辆的行驶性能。控制策略的研究对于主动悬架系统非常重要,目前已经成熟且广泛应用的控制方法有天棚控制^[2]、比例-积分-微分(PID)控制^[3]、模糊控制^[4]、滑模控制^[5]、自抗扰控制^[6]等,其中PID控制具有控制参数少、原理简单等优点,广泛应用于工业控制领域。

文献[7]借助模糊控制策略优化PID控制器参数,解决了悬架运动过程中PID控制器参数不可变的问题,改善了车辆驾驶稳定性,但模糊控制规则的制定及隶属度函数的选择均依据个人经验,具有一定的局限性。文献[8]针对PID参数整定问题,设计了基于固定权值的粒子群优化(PSO)算法优化PID控制器并应用于悬架系统,优化后的悬架性能得到有效提升,但固定权值的PSO算法收敛速度较慢,且容易陷入局部最优解。文献[9]提出应用线性递减权值PSO算法优化LQR控制中的 Q 矩阵和 R 矩阵,提高了算法的搜索能力并使算法计算速度和全局收敛性得到优化,但仅针对PSO算法中的惯性权重进行了优化,忽略了粒子间相互学习的过程。

为了进一步提高PSO算法的收敛速度和全局搜索能力,本文针对二自由度主动悬架系统,设计PSO算法并优化PID控制器的参数,同时在标准PSO算法的基础上,提出一种改进PSO算法,对学习因子和惯性权重进行动态调整;通过模拟随机路面激励输入^[10]和梯形冲击路面激励输入^[11],对比分析该控制策略应用于悬架系统时对车辆振动的抑制效果,以期提高悬架系统的性能。

1 悬架系统建模及路面激励输入

1.1 悬架系统建模

将车辆主动悬架系统简化为路面激励输入单元、无阻尼弹性轮胎单元、包含弹簧和阻尼的悬架单元及簧载质量车体单元,由此建立二自由度车辆主动悬架模型,如图1所示。图中: m_s 为等效车体质量; m_u 为车轮质量; Z_s 表示车体绝对位移; Z_u 为车轮绝对位移; Z_0 为路面激励位移; k_t 为车轮的等效刚度; k_s 为悬架系统的等效刚度; c_s 为悬架系统的阻尼系数; F 为作动器输出的主动控制力。

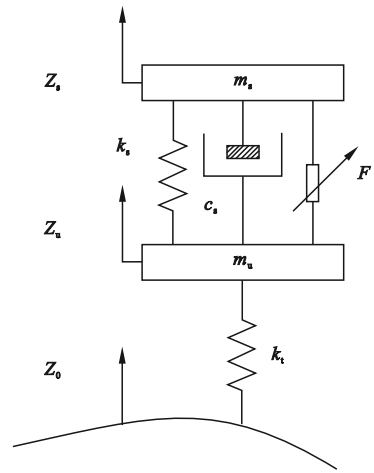


图1 二自由度车辆主动悬架模型

Fig. 1 Two-degree-of-freedom vehicle active suspension model

如图1所示,根据牛顿动力学定律,建立主动悬架系统的动力学微分方程为

$$m_s \ddot{Z}_s = -c_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - k_s(Z_s - Z_u) + F \quad (1)$$

$$m_u \ddot{Z}_u = c_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + k_s(Z_s - Z_u) - k_t(Z_u - Z_0) - F \quad (2)$$

悬架系统各参数如表1所示。

表1 悬架系统参数

Table 1 Suspension system parameters

车辆参数	符号	数值	单位
车体质量	m_s	310	kg
车轮质量	m_u	70	kg
车轮刚度	k_t	309 511	$N \cdot m^{-1}$
悬架刚度	k_s	27 358	$N \cdot m^{-1}$
悬架阻尼	c_s	984	$N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$

1.2 路面激励输入建模

分别建立随机路面激励输入和模拟减速带的梯形路面激励输入,其中减速带式梯形路面激励输入可以模拟汽车行驶过程中遇到短暂冲击时的情况,本文建立的模型均假设汽车以10 m/s的速度匀速通过总长为100 m标准B级路面。

1.2.1 随机路面激励建模

采用滤波白噪声法^[12]建立随机路面激励输入,方程式为

$$\dot{Z}(t) = -2\pi f_0 Z(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u w(t) \quad (3)$$

式中: t 为时间; u 为车辆行驶速度; f_0 为路面空间截止频率; $w(t)$ 为激励量的时域表示,是白噪声信号; $Z(t)$ 为路面激励响应量的时域表示; n_0 为参考

空间频率; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数。随机路面输入时域响应的仿真结果如图 2 所示。

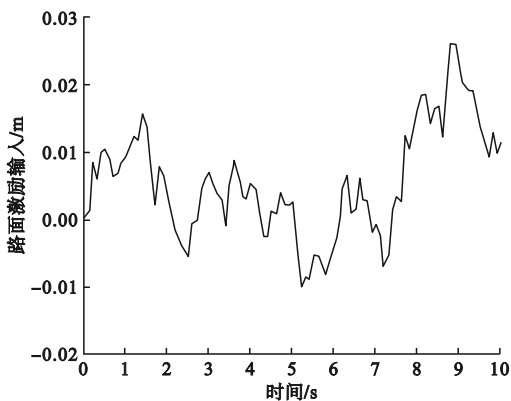


图 2 随机路面输入时域响应

Fig.2 Random pavement input time domain response

1.2.2 冲击路面激励建模

在实际车辆行驶过程中,经常会遇到有减速带的路面,这将会对车辆行驶平顺性产生一定的影响,因此,建立梯形减速带式路面激励模型对分析悬架系统的抗扰动能力很有必要。梯形冲击路面激励模型如图 3 所示。图中: a 、 b 、 c 和 d 分别为梯形冲击路面激励作用的起始点、最高点、保持点和截止点; h 为冲击作用的最高点相对于水平路面的高度。

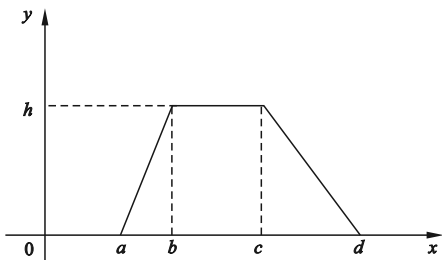


图 3 梯形冲击路面激励模型

Fig.3 Trapezoidal impact pavement excitation model

由此可以建立基于水平方向行驶位移的梯形冲击路面激励模型^[11],其函数表达式为

$$y(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{h}{b-a}(x-a), & a < x \leq b \\ h, & b < x \leq c \\ \frac{h}{c-d}(x-d), & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (4)$$

冲击路面输入时域响应如图 4 所示。

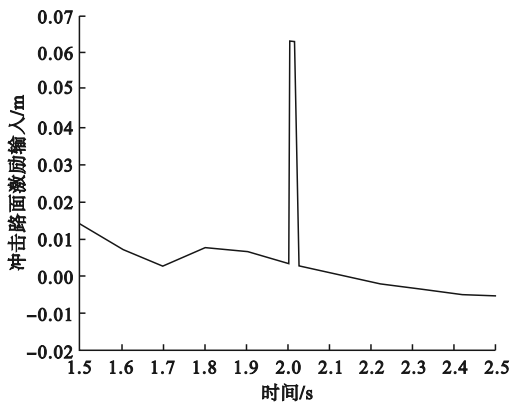


图 4 冲击路面输入时域响应

Fig.4 Impact pavement input time domain response

2 改进粒子群算法优化 PID 控制器

2.1 PID 控制器在主动悬架上的应用

PID 控制系统是利用设定的目标值与实际输出值的偏差,对被控对象进行的一种线性控制。控制系统通常由被控对象和 PID 控制器两部分组成。

PID 控制器通过比较控制系统的输入量与参考值的差值得到系统的误差,对误差进行比例、积分和微分运算,并将这三种运算进行线性加权求和处理并输出,从而构成 PID 控制器并由此实现对被控对象的控制。本文选取悬架系统车身加速度与参考值的差值作为系统的状态误差,由此得到 PID 控制器的数学表达式为

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: $u(t)$ 为控制系统输出; $e(t)$ 为系统误差; k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_d 为微分系数。

2.2 改进粒子群算法

粒子群算法是一种智能优化算法,也是一种群体迭代算法,其通过模拟种群的觅食行为并通过当前已知种群寻找到的所有解来决定新解。粒子群算法中的每个粒子都代表一个潜在解,每个粒子对应一个由目标函数决定的适应度值。粒子的速度决定了粒子移动的方向和距离,速度随自身及其他粒子的移动进行动态调整,从而实现个体在空间中的寻优。

假设空间维度为 N ,种群规模为 m ,迭代次数为 n ,则 N 维空间第 i 个粒子 ($1 \leq i \leq m$) 的速度更新计算式为

$$v_i^N(k+1) = wv_i^N(k) + c_1 r_1 [p_i - x_i^N(k)] +$$

$$c_2 r_2 [p_g - x_i^N(k)] \quad (6)$$

式中: w 为惯性权重; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数; c_1 、 c_2 分别为自身学习因子和种群学习因子; p_i 为第 i 个粒子在之前所有迭代中的最优位置; p_g 为种群在之前所有迭代中的最优位置; $x_i^N(k)$ 为 N 维空间第 i 个粒子在第 k 次迭代中的最优位置。

同理, 对于 N 维空间第 i 个粒子, 其第 $k+1$ 次迭代的位置 $z_i^N(k+1)$ 与第 k 次迭代的位置 $z_i^N(k)$ 及速度 $v_i^N(k+1)$ 的关系为

$$z_i^N(k+1) = z_i^N(k) + v_i^N(k+1) \quad (7)$$

式(6)中 w 的取值会影响粒子的运动状态, c_1 、 c_2 的取值则决定了粒子群的搜索能力。考虑到传统粒子群算法中固定的权值容易使算法陷入局部最优解, 针对这一缺点, 从惯性权重和学习因子两方面进行改进, 改进后的策略如下。

$$w(k) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \cdot \left(\frac{k}{\text{gens}}\right)^2 \quad (8)$$

式中: k 为当前迭代次数; w_{\max} 为惯性权重最大值; w_{\min} 为惯性权重最小值; gens 为最大迭代次数。

在迭代初期, 较大的惯性权重可以使算法不易陷入局部最优, 便于全局搜索, 而在迭代后期, 较小的惯性权重有利于局部搜索。

$$\begin{cases} c_1 = c_{1s} + (c_{1e} - c_{1s}) \frac{k}{\text{gens}} \\ c_2 = c_{2s} + (c_{2e} - c_{2s}) \frac{k}{\text{gens}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: c_{1s} 为 c_1 的初始值; c_{1e} 为 c_1 的末尾值; c_{2s} 为 c_2 的初始值; c_{2e} 为 c_2 的末尾值。 c_{1s} 大于 c_{1e} , c_{2s} 小于 c_{2e} 。

在迭代初期, 较大的自身学习因子和较小的种群学习因子可以使粒子具有较强的自学习能力和较弱的社会学习能力, 有利于全局搜索; 在迭代后期, 较小的自身学习因子和较大的种群学习因子使粒子具有较强的社会学习能力和较弱的自学习能力, 有利于算法最后收敛。

2.3 设置适应度函数及约束条件

本文选取车身加速度的 ITAE(时间乘以绝对误差积分)^[13] 性能指标作为 PSO 算法优化 PID 控制器参数的目标函数, 即

$$\text{ITAE} = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt \quad (10)$$

在优化控制器的过程中还需要对悬架系统设置约束条件: 悬架的动静载荷比小于 1, 防止轮胎脱离地面; 悬架动行程不超过允许的最大值。

$$\frac{F_d}{G} = \frac{k_1(Z_u - Z_0)}{(m_s + m_u)g} < 1 \quad (11)$$

$$Z_s - Z_u < Z_{\max} \quad (12)$$

式中: F_d 为动载荷; G 为静载荷; g 为重力加速度; Z_{\max} 为悬架动行程允许最大值。

3 仿真分析

3.1 仿真参数设置

粒子群的搜索维度是三维(分别对应 PID 控制器的三个参数)。经过初步调试, 设置粒子群算法优化 PID 控制器的三个参数 k_p 、 k_i 、 k_D 的取值范围分别为 $[0, 500]$ 、 $[0, 500]$ 、 $[0, 1]$ 。改进粒子群算法中的具体参数为: 惯性权重最大值 $w_{\max} = 0.9$; 惯性权重最小值 $w_{\min} = 0.4$; 自身学习因子 $c_{1s} = 0.8$, $c_{1e} = 0.4$; 种群学习因子 $c_{2s} = 0.4$, $c_{2e} = 0.4$ 。

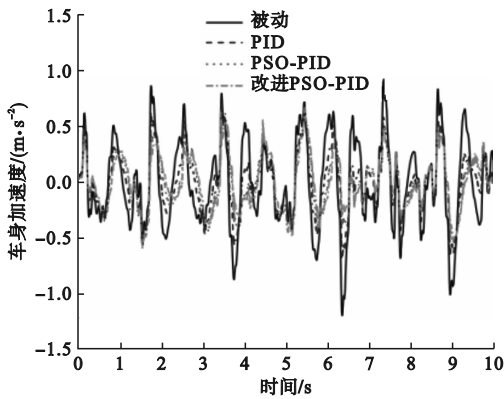
3.2 MATLAB/Simulink 联合仿真

通过 Simulink 平台可以搭建基于粒子群算法优化 PID 控制器的主动悬架仿真模型, 如图 5 所示。设置仿真时间为 10 s。利用粒子群优化 PID 控制器流程如图 6 所示, 其代码通过 MATLAB 实现。首先在 MATLAB 中运行粒子群算法程序, 随机生成三维粒子并分别赋值给 PID 控制器的三个参数。在运行悬架系统仿真模型后, 根据设置的目标函数计算适应度值, 同时根据本文 2.3 中建立的约束条件判断此时悬架系统是否满足要求, 若满足, 则记录此时的粒子群位置并更新个体最优适应度值和群体最优适应度值, 直到满足优化程序的终止条件或者达到设定的最大迭代次数, 最后记录粒子群的群体最优值及最优适应度。

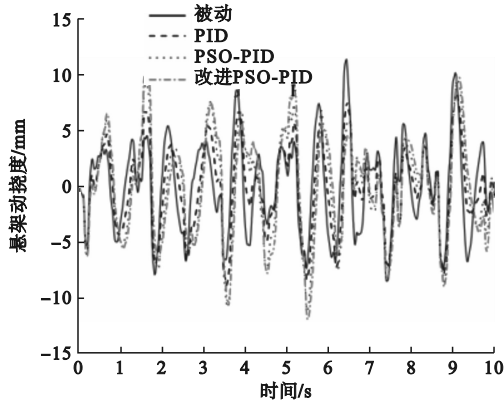
3.3 仿真结果分析

在白噪声随机路面激励输入条件下, 基于标准粒子群算法优化的 PID 控制器参数为: $k_p = 100$, $k_i = 500$, $k_D = 1$; 基于改进粒子群算法优化后的 PID 控制器参数为: $k_p = 359.4688$, $k_i = 296.4580$, $k_D = 0.2596$ 。粒子群算法改进前后目标函数的最优适应度值变化对比如图 7 所示。仿真结果对比如图 8 所示。

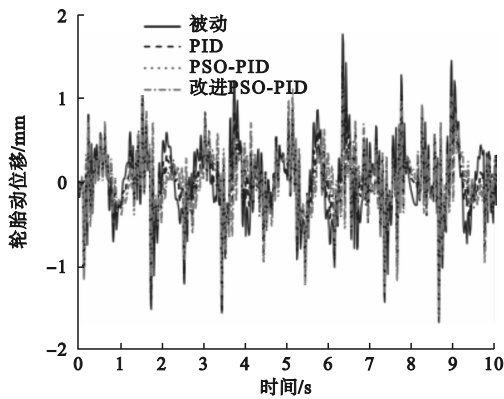
由图 7 可知, 基于改进 PSO 算法优化的目标函数最优适应度值在迭代到 36 代时收敛, 收敛速度快于基于标准 PSO 算法, 这是因为改进 PSO 算法在迭代初期具有较强的全局搜索能力而在迭代后期具有较强的局部搜索能力, 这使得算法的寻优能力大大增强; 同时, 基于改进 PSO 算法优化的目标函数最优适应度值也低于基于标准 PSO 算法优化后的结果。基于不同控制算法优化的悬



(a) 车身加速度



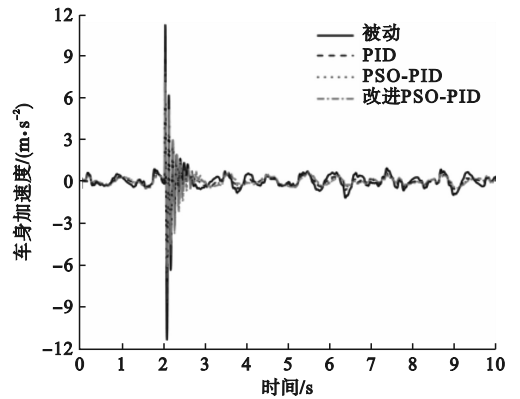
(b) 悬架动挠度



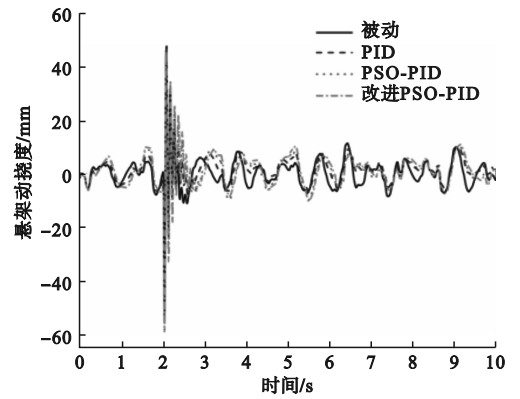
(c) 轮胎动位移

图8 随机路面激励下不同控制策略仿真结果对比
Fig.8 Comparison of simulation results of different control strategies under random pavement excitation

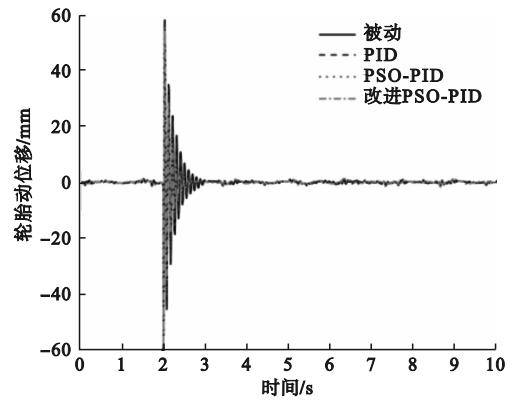
由图9可见,在冲击路面激励下,经过改进PSO-PID控制的主动悬架的各评价指标峰值均有所减小,具体数值如表3所示。由此可得,经过改进粒子群算法优化后的PID控制器的控制效果相较于试凑法以及标准PSO算法优化PID控制器的控制效果均有很大提升,也为PID控制器参数整定问题提供了新思路。



(a) 车身加速度



(b) 悬架动挠度



(c) 轮胎动位移

图9 冲击路面激励下不同控制策略仿真结果对比
Fig.9 Comparison of simulation results of different control strategies under impact pavement excitation

表3 冲击路面激励下悬架性能评价指标峰值
Table 3 Peak indexes for evaluation of suspension performance under impact pavement excitation

	被动	PID	PSO-PID	改进PSO-PID
车身加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	11.161 4	9.212 6	7.988 6	7.196 2
悬架动挠度/ mm	59.773 2	58.112 1	53.552 6	47.760 1
轮胎动位移/ mm	59.421 0	58.990 5	58.790 4	58.535 2

4 结论

本文首先建立了二自由度1/4车辆主被动悬架模型,设计了一种基于改进粒子群算法优化的PID控制器,通过优化粒子群算法中的学习因子和惯性权重从而增强算法的全局寻优能力,并分别模拟随机路面激励输入和减速带式梯形冲击路面激励输入。仿真结果表明:在随机路面激励输入条件下,基于改进粒子群算法优化PID控制的主动悬架能够有效降低车身垂向振动加速度和轮胎动位移;在梯形冲击路面激励输入条件下,基于改进粒子群算法优化PID控制的主动悬架能够有效降低三个悬架性能评价指标的峰值。由此可以验证,基于改进粒子群算法优化的主动悬架能够较好地应对不同路面激励对车辆造成的振动与冲击,有效提高车辆的行驶平顺性。

参考文献(References):

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 庞辉,付文强,刘凯,等. 基于天棚控制的半主动悬架建模及稳定性分析[J]. 汽车工程,2015,37(10):1167-1173.
PANG H, FU W Q, LIU K, et al. Modeling and stability analysis of semi-active suspension with sky-hook control[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(10): 1167-1173. (in Chinese)
- [3] 胡国良,林豪,李刚. 采用磁流变阻尼器的人体座椅悬架系统模糊ANFIS-PID复合控制技术研究[J]. 现代制造工程, 2020(2):26-33.
HU G L, LIN H, LI G. Fuzzy ANFIS-PID compound control technology of human seat suspension system using magnetorheological damper[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(2):26-33. (in Chinese)
- [4] LI G, RUAN Z Y, GU R H, et al. Fuzzy sliding mode control of vehicle magnetorheological semi-active air suspension[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22):10925.
- [5] 代勇,王铎,吴佳欣,等. 基于鲁棒Tube-MPC算法的无人车横向控制方法研究[J]. 沈阳理工大学学报,2023,42(3):28-34.
DAI Y, WANG D, WU J X, et al. Research on lateral control method of unmanned vehicle based on robust Tube-MPC algorithm[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2023, 42(3):28-34. (in Chinese)
- [6] 桑楠,魏民祥. 车辆主动前轮转向与主动悬架的自抗扰控制方法[J]. 南京理工大学学报,2017,41(2):165-172,185.
SANG N, WEI M X. Active disturbance rejection control method of active front wheel steering and active suspension system of vehicle[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(2):165-172,185. (in Chinese)
- [7] 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.
LIU X A, ZHANG J Q, WANG S. Vibration analysis of automobile semi-active suspension based on fuzzy proportion integration differentiation algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2):781-785. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 耿玺钧,崔立堃,冯绪永,等. 基于线性递减权重值PSO算法优化LQR控制的主动悬架性能研究[J]. 现代制造工程, 2023(1):43-49.
GENG X J, CUI L K, FENG X Y, et al. Research of active suspension performance based on linear decreasing weight PSO algorithm to optimize LQR controller[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(1):43-49. (in Chinese)
- [10] 赵珩,卢士富. 路面对四轮汽车输入的时域模型[J]. 汽车工程,1999,21(2):112-117.
ZHAO H, LU S F. A vehicle's time domain model with road input on four wheels[J]. Automotive Engineering, 1999, 21(2):112-117. (in Chinese)
- [11] 孙永胜. 连续减速带激励下车辆悬架系统非线性振动与控制[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [12] FENG L K, ZHAO X Y, ZHANG W H, et al. Regulation control for discrete-time stochastic nonlinear active suspension[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20(3):888-896.
- [13] 魏彬,唐风轩,梁畅,等. 基于变论域模糊PID的航空转台控制系统研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022,49(2):107-115.
WEI B, TANG F X, LIANG C, et al. An aviation turntable control system based on a variable universe fuzzy proportion integral differential (PID)[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2022, 49(2):107-115. (in Chinese)

(责任编辑:徐淑姣)