

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.09.017

# 基于路面识别的非线性悬架系统自适应控制

孙晋伟, 秦也辰, 王振峰, 顾亮

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对非线性悬架系统, 基于多目标布谷优化和路面识别算法, 研究不同路面等级下悬架非线性系统特性, 实现根据路面等级调整控制参数的目的. 首先建立四分之一车辆模型, 选取电流为优化变量, 簧载质量加速度和轮胎动行程为优化目标; 然后利用布谷优化算法求取不同路面下悬架最优参数, 并利用路面识别方法得到当前路面等级, 结合悬架性能需求实现悬架在不同路面下自适应调节. 仿真结果表明: 1) 控制算法可根据不同路面情况自适应调整悬架参数, 提高系统性能; 2) 相比于传统粒子群优化方法(PSO), 基于布谷优化算法得到的控制电流能提供更为理想的悬架系统性能.

**关键词:** 非线性悬架; 路面识别; 布谷优化; 平顺性; 操纵稳定性

中图分类号: TH 113 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)09-1299-05

## Adaptive Control of the Nonlinear Suspension System Based on Road Estimation

SUN Jin-wei, QIN Ye-chen, WANG Zhen-feng, GU Liang

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. Corresponding author: GU Liang, E-mail: guliang@bit.edu.cn)

**Abstract:** To adjust the control parameters according to road levels and study the characteristics of suspension nonlinear parameters under different road levels, an algorithm was proposed based on cuckoo search optimization and road estimation. Firstly, a quarter nonlinear suspension model with nonlinear dampers and springs was created, which sprung mass acceleration and tire deflection were taken as the optimization objective and the current of nonlinear dampers was taken as the optimization variable. Then, a cuckoo search-based multi-objective optimization method was used to calculate the optimal control parameter, and a road estimation method was used to identify the road level to adaptively adjust the system performance according to road input. The simulation results showed that: 1) the road estimation and cuckoo search-based algorithm can adjust the control parameter adaptively according to road levels, and the proposed method can improve riding comfort when the tire keeps contacting the road surface; 2) compared with the particle swarm optimization (PSO), the current calculated by cuckoo search can provide better suspension performances.

**Key words:** nonlinear suspension; road estimation; cuckoo search optimization; riding comfort; handling stability

车辆悬架系统参数直接影响悬架的性能<sup>[1-2]</sup>. 传统被动悬架难以适应复杂路面条件下的性能需求, 因此研究人员提出了可控悬架的概念. 与主动悬架相比, 半主动悬架通过调节阻尼参数改变阻尼力, 具有功耗小、可靠性高且具有较大控制带宽等特点, 得到了广泛的研究与应用.

在半主动悬架控制方面, Karnopp 于 1974 年提出了天棚阻尼控制的算法<sup>[3]</sup>, 通过簧载质量与假想的惯性参考之间的阻尼抑制簧载质量振动. 文献<sup>[4]</sup>指出, 基于状态反馈的理想天棚阻尼可以得到近似于主动悬架的乘坐舒适性效果. 考虑到天棚算法在提高舒适性的同时不可避免地恶化

收稿日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1564210); 中国博士后科学基金资助项目(2016M600934, BX201600017).

作者简介: 孙晋伟(1987-), 男, 山西忻州人, 北京理工大学博士研究生; 顾亮(1958-), 男, 山东淄博人, 北京理工大学教授, 博士生导师.

操纵稳定性, Valasek 等<sup>[5]</sup>提出了地棚算法, Ahmadian 等<sup>[6]</sup>进一步提出天棚和地棚相结合的混合控制算法. 在悬架参数选择方面, 董明明等<sup>[7]</sup>利用统计线性化分析的方法得到了非线性阻尼悬架响应均方根值的计算公式. 张振华等<sup>[8]</sup>推导了悬架最优阻尼解析表达式. 秦也辰<sup>[9]</sup>利用路面识别算法实现了半主动悬架的自适应控制.

本文针对非线性悬架控制与路面识别算法相结合的问题, 采用多目标布谷优化算法寻找不同等级路面下系统最优参数, 建立依据簧载质量加速度响应获取路面信息的路面识别算法, 提出了一种基于多目标优化和路面识别的非线性悬架自适应控制方法.

## 1 四分之一非线性悬架模型

### 1.1 非线性阻尼模型

针对半主动悬架常用的阻尼连续可调(CDC)减振器进行特性试验. 图 1 为 CDC 减振器阻尼力-速度特性曲线. 采用多项式拟合的方式建立 CDC 减振器非线性模型, 拟合多项式分为极值多项式和形状函数<sup>[10]</sup>. 极值多项式为

$$A_{\text{CDC}}(i) = \sum_{n=0}^k a_n i^n, \quad (1)$$

式中  $A_{\text{CDC}}(i)$  表示当前输入电流下阻尼力的最大值.

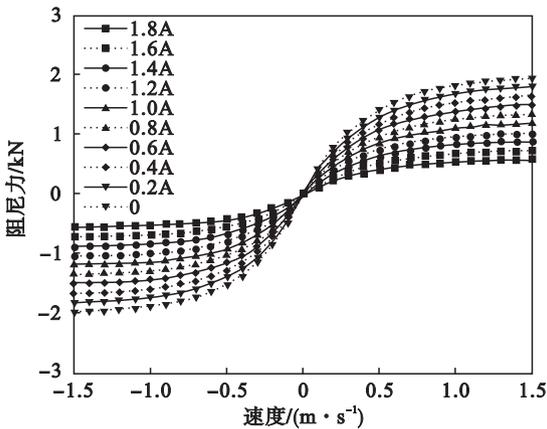


图 1 CDC 减振器阻尼力-速度特性曲线

Fig. 1 CDC damper force-velocity characteristics

CDC 减振器速度-阻尼力特性可由式(2)表示:

$$S_b(\dot{x}_b - \dot{x}_w) = \text{sign}(\dot{x}_b - \dot{x}_w) \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b_0 |\dot{x}_b - \dot{x}_w|}{V_0}\right) \right]. \quad (2)$$

式中:  $b_0$ ,  $V_0$  均为形状函数参数;  $\dot{x}_b$  和  $\dot{x}_w$  分别表示簧载质量速度和非簧载质量速度. 将式(1)与

式(2)结合即可得到以减振器速度为变量、通过输入电流控制的阻尼力输出模型:

$$F_d = A_{\text{CDC}}(i) \cdot S_b(\dot{x}_b - \dot{x}_w). \quad (3)$$

### 1.2 非线性弹簧模型

非线性弹簧特性如图 2 所示, 可表示为

$$F_s = k_s(x_b - x_w) + \delta k_s(x_b - x_w)^3. \quad (4)$$

其中  $\delta$  表示弹簧非线性强度参数,  $\delta > 0$ .

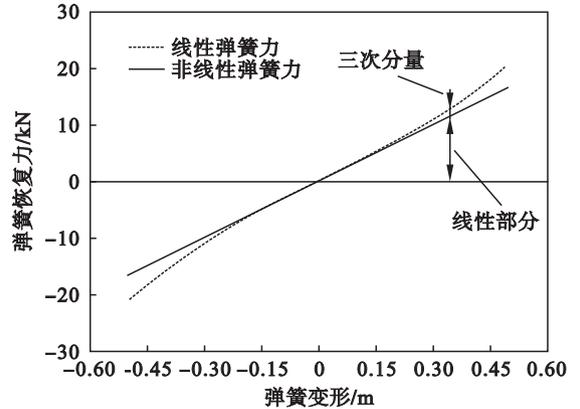


图 2 非线性弹簧力特性

Fig. 2 Force characteristics of nonlinear springs

### 1.3 四分之一车模型

典型的四分之一车模型如图 3 所示,  $m_s$  和  $m_u$  表示簧载、非簧载质量,  $x_b$ ,  $x_w$  和  $x_r$  分别代表簧载质量位移、非簧载位移和路面激励.

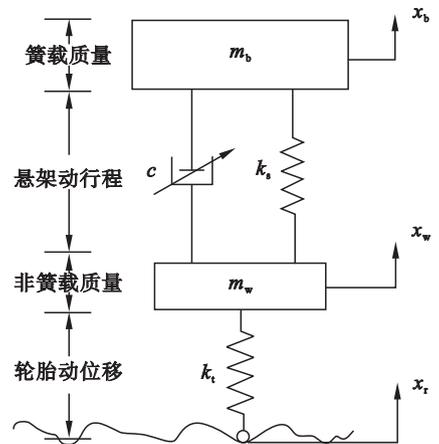


图 3 四分之一车模型

Fig. 3 One quarter vehicle model

建立四分之一车非线性系统模型如下:

$$m_b \ddot{x}_b + F_d + F_s = 0, \quad (5)$$

$$m_w \ddot{x}_w - F_d - F_s + F_t = 0. \quad (6)$$

其中:  $F_d$  和  $F_s$  为阻尼和弹性力;  $F_t$  为轮胎动载.

### 1.4 路面激励模型

路面功率谱密度  $G_q(n)$  为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w}. \quad (7)$$

采用滤波白噪声将路面激励看作单位白噪声激励的响应,则系统频响函数为

$$H_{q-w}(\omega) = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v}{j\omega + 2\pi n_{00} v} \quad (8)$$

将式(8)转化成微分方程即可得路面激励  $x_r$  的时域模型

$$\dot{x}_r(t) = -2\pi n_{00} v x_r(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v \omega(t) \quad (9)$$

## 2 布谷优化算法

### 2.1 优化问题

选取减振器输入电流为优化变量,悬架动行程为约束,簧载质量加速度和轮胎动位移的均方根值为优化目标.

$$\begin{aligned} \text{最小化: } f_1(i) &= \text{rms}(\ddot{x}_b); \\ f_2(i) &= \text{rms}(x_w - x_r). \end{aligned}$$

$$\text{约束条件: } 6 \cdot \text{rms}(x_b - x_w) \leq \text{lim}(x_b - x_w).$$

其中:  $\text{rms}(\ddot{x}_b)$  和  $\text{rms}(x_w - x_r)$  分别表示簧载加速度和轮胎动位移的均方根值;  $\text{lim}(x_b - x_w)$  表示悬架的极限动行程.

### 2.2 布谷优化算法

布谷算法(CS)是 Yang 等<sup>[11]</sup>提出的一种全局优化算法,如图 4 所示. CS 结合局部随机游走和全局搜索随机游走策略,通过概率参数  $p_a$  切换. 局部随机游走可表示为

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha s \otimes H(p_a - \epsilon) \otimes (X_i^t - X_k^t) \quad (10)$$

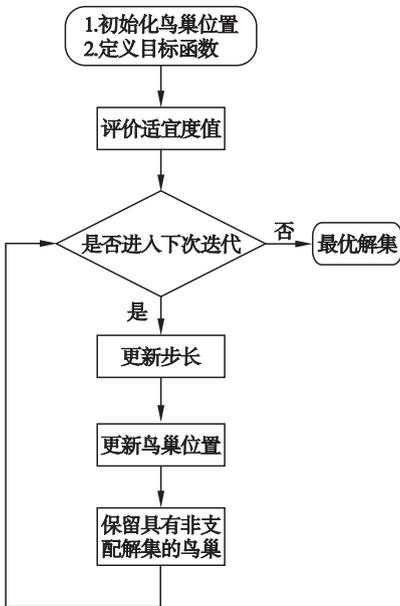


图 4 布谷优化流程图

Fig. 4 Flow chart of the cuckoo search optimization algorithm

其中:  $X_i^t$  表示随机选择的解;  $H(u)$  表示 Heaviside 函数;  $\epsilon$  是均匀分布中随机选择的数;  $\alpha$  为步长比例因子;  $s$  为示步长.

基于 Levy 飞行的全局随机游走可表示为

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha L(s, \beta) \quad (11)$$

$$L(s, \beta) = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (12)$$

其中,  $u$  和  $v$  均服从正态分布.

### 2.3 半主动悬架参数优化

本节采用如下布谷优化参数进行仿真: 鸟巢个数为 200, 最大更新代数为 100; 路面输入选取 C 级路面、车速 120 km/h. 计算所得 Pareto 前沿如图 5 所示. 由图 5 可知, 所求得的 Pareto 前沿分布均匀, 多样性较好.

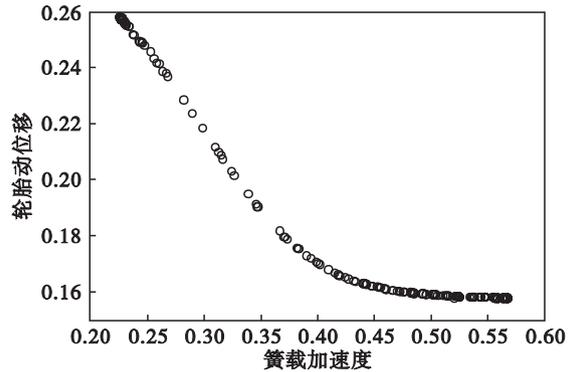


图 5 非线性悬架 Pareto 最优解集

Fig. 5 Pareto optimal solutions to nonlinear suspension

## 3 路面识别算法

由第 2 节可知, 利用多目标优化算法可得到不同路面、车速下的最优解. 为自适应调整悬架控制参数, 需要进行路面识别.

### 3.1 路面识别算法原理

路面识别是利用加速度信号提取路面的时频特征, 将无法直接测量的路面信息与加速度联系起来进行路面识别. 将簧载加速度进行三层小波变换, 小波变换图如图 6 所示. 其中,  $\downarrow 2$  表示以 2 为倍数向下采样,  $g(s)$  和  $h(s)$  分别表示配对的高通和低通滤波器. 本文采用小波变换和双层自适应神经模糊网络(ANFIS)分类器<sup>[12]</sup>进行路面等级识别. 路面识别及整体控制流程如图 7 所示.

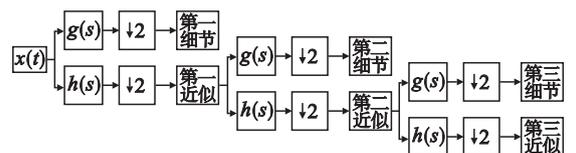


图 6 小波变换流程图

Fig. 6 Flow chart of wavelet transformation

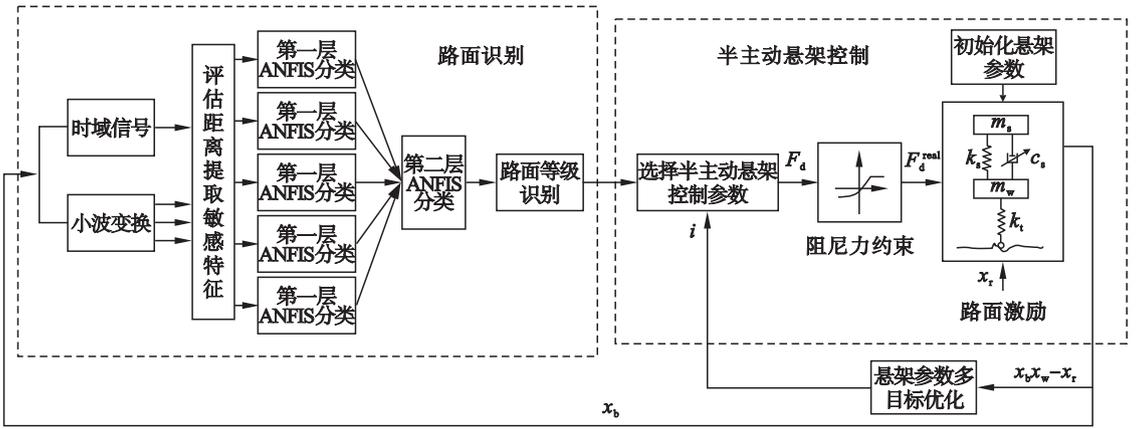


图 7 半主动悬架闭环控制框图

Fig. 7 Closed-loop control diagram of semi-active suspension

### 3.2 半主动悬架路面等级识别

选取车速为 120 km/h,间隔为 20 s 的 5 段路面时域信号,分别为 B 级路面、D 级路面、E 级路面、F 级路面和 C 级路面,如图 8 所示。

应用双层 ANFIS 分类器对图 8 所示路面进行路面特征识别,得到路面识别结果如图 9 所示。由图 9 可知随着路面等级增加,路面识别结果相对误差增大,但识别结果全部集中于所对应等级附近。

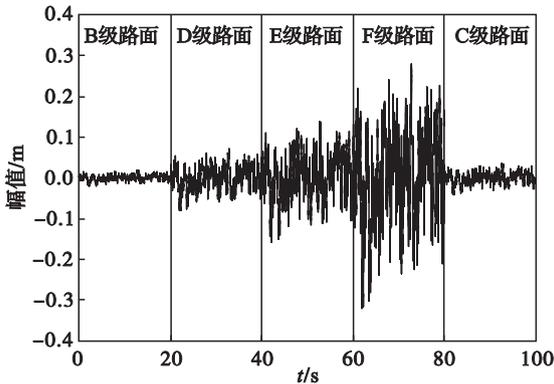


图 8 路面激励时域信号

Fig. 8 Road profile in the time domain

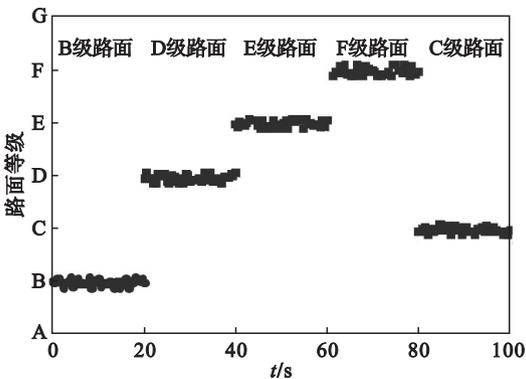


图 9 路面等级识别结果

Fig. 9 Classification results of road level identification

## 4 仿真分析

车辆仿真参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 悬架仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the suspension system

参数符号	参数值	参数符号	参数值
$m_b/\text{kg}$	256	$b_0^+$	3.41
$m_w/\text{kg}$	42	$V_0^+$	-2 002.45
$k_t/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	190 000	$a_0^-$	-2 002.45
$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	16 812	$a_1^-$	801.58
$a_0^+$	4 002.72	$b_0^-$	9.48
$a_1^+$	-1 567.91	$V_0^-$	3.38
$\delta$	0.1	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	120

从车辆动力学角度来说,条件较差的路面会导致系统输入能量和“轮跳”出现的概率增大,因此在条件较差的路面应侧重于车辆的操纵稳定性;反之,良好的路面“轮跳”出现的概率大大减小,因而在良好路面时应侧重于车辆的乘坐舒适性<sup>[13]</sup>。定义不同路面等级操纵稳定性与乘坐舒适性的权重,路面等级对应的参数及布谷优化算法所得电流控制参数如表 2 所示。

表 2 不同路面权重与控制参数

Table 2 Weight and control parameter for different road profiles

路面等级	权重 $[w_{acc}, w_{tire}]$	控制参数 $i$
良好(A 级、B 级)	[0.8, 0.2]	$i_A = 1.946; i_B = 1.791$
一般(C 级、D 级)	[0.6, 0.4]	$i_C = 1.429; i_D = 1.202$
较差(E 级、F 级)	[0.4, 0.6]	$i_E = 0.590; i_F = 0.093$

B级路面,当车速为120 km/h时,CS与PSO的迭代次数及适应度值如图10所示。由图10可知,与PSO相比,CS求得的适应度值小,搜索范围大,搜索到最优解的概率更高。利用路面识别所得B~E级路面结果,分别得到基于CS优化以及PSO优化的簧载质量加速度均方根值和轮胎动位移的均方根值,见图11。由图11可知,与PSO相比,CS在非线性的悬架寻优中找到最优解的概率更大,在满足悬架动行程约束的基础上能有效地改善车辆的平顺性,同时保证轮胎动位移不恶化。

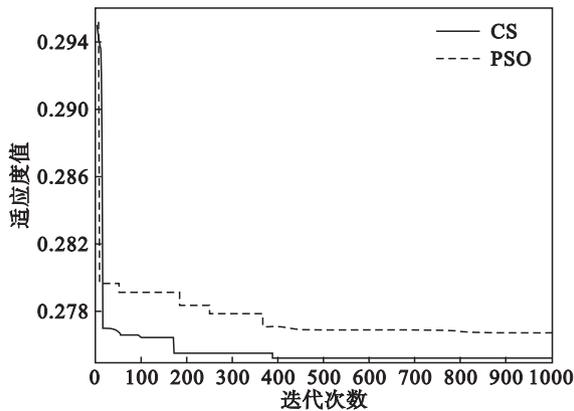


图10 PSO与CS收敛性比较

Fig. 10 Convergence comparison of CS and PSO

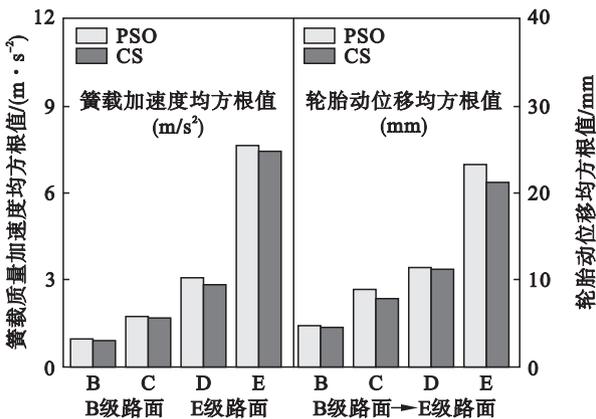


图11 不同路面等级下簧载质量加速度和轮胎动位移的变化

Fig. 11 Changes in sprung acceleration and tire deflection under different road levels

## 5 结 论

- 1) 路面识别算法能够准确识别路面等级;
- 2) 布谷优化算法所得到的 Pareto 前沿分布均匀,多样性好,搜索效率更高;
- 3) 所提出控制算法能够自适应的调整悬架控制参数,有效提高悬架系统性能。

## 参考文献:

- [1] Rajamani R. Vehicle dynamics and control[M]. California: Springer,2006.
- [2] Gobbi M, Mastinu G. Analytical description and optimization of the dynamic behaviour of passively suspended road vehicles[J]. *Journal of Sound & Vibration*,2001,245(3):457-481.
- [3] Karnopp D, Crosby M J, Harwood R A. Vibration control using semi-active force generators [J]. *Journal of Engineering for Industry*,1974,96(2):619-626.
- [4] Yu H, Sun X, Xu J, et al. The time-delay coupling nonlinear effect in sky-hook control of vibration isolation systems using Magneto-Rheological fluid dampers [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(9):4157-4166.
- [5] Valášek M, Novák M, Šika Z, et al. Extended ground-hook-new concept of semi-active control of truck's suspension[J]. *Vehicle System Dynamics*,1997,27(5/6):289-303.
- [6] Ahmadian M, Pare C A. A quarter-car experimental analysis of alternative semiactive control methods [J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*,2000,11(8):604-612.
- [7] 董明明, 骆振兴, 刘伯庚. 单轮车辆非线性悬架的最优阻尼匹配[J]. *北京理工大学学报*,2015,35(7):697-700. (Dong Ming-ming, Luo Zhen-xing, Liu Bo-geng. Optimum damping match for the single wheel vehicle nonlinear suspension [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*,2015,35(7):697-700.)
- [8] 张振华, 董明明. 2自由度车辆悬架线性模型最佳阻尼比的解析分析[J]. *北京理工大学学报*,2008,28(12):1057-1059. (Zhang Zhen-hua, Dong Ming-ming. Analysis on the optimal ratio on a 2 DOF linear model of vehicle suspension [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*,2008,28(12):1057-1059.)
- [9] 秦也辰. 基于路面识别的车辆半主动悬架控制研究[D]. 北京:北京理工大学,2016. (Qin Ye-chen. Research on vehicle semi-active suspension system based on road estimation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2016.)
- [10] Song X, Ahmadian M, Southward S C. Modeling magnetorheological dampers with application of nonparametric approach [J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*,2005,16(5):421-432.
- [11] Yang X S, Deb S. Multiobjective cuckoo search for design optimization[J]. *Computers & Operations Research*,2013,40(6):1616-1624.
- [12] Qin Y, Dong M, Zhao F, et al. Road profile classification for vehicle semi-active suspension system based on adaptive neuro-fuzzy inference system [C]// IEEE Conference on Decision and Control. Osaka: IEEE,2015:1533-1538.
- [13] Hong K S, Sohn H C, Hedrick K J. Modified skyhook control of semi-active suspensions: a new model, gain scheduling, and hardware-in-the-loop tuning[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*,2002,124(1):158-167.