

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 08. 016

# 基于路面识别的车辆半主动悬架控制

秦也辰,董明明,赵 丰,顾 亮  
(北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081)

**摘 要:** 以实现悬架自适应半主动控制为目的,基于多目标优化算法及路面识别,针对车辆平顺性与操纵稳定性进行研究. 首先建立 1/4 车辆等效天棚控制模型,并根据系统动力学关系推导车辆簧载质量加速度及轮胎动载荷的解析解表达式,然后利用基于遗传算法的多目标优化算法求取 Pareto 最优解集. 依据路面识别得到的路面等级分配控制权重,以获得不同路面对应的控制增益. 仿真结果显示,基于路面识别的半主动悬架自适应控制系统能够通过调节权重获得不同路面行驶条件下平顺性与操纵稳定性之间的平衡.

**关 键 词:** 悬架半主动控制;多目标优化;路面等级识别;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( 2016 )08 - 1138 - 06

## Suspension Semi-active Control of Vehicles Based on Road Profile Classification

QIN Ye-chen , DONG Ming-ming , ZHAO Feng , GU Liang  
( School of Mechanical Engineering , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 , China. Corresponding author : GU Liang , E-mail : guliangbit@gmail. com )

**Abstract :** To realize suspension semi-active adaptive control and the compromise between ride comfort and control stability , an algorithm based on multi-objective optimization and road recognition was proposed. Firstly , we built an equivalent quarter vehicle model with skyhook control , and established analytical descriptions , based on the system dynamics , for vehicle sprung mass acceleration and tire force. Then , a genetic-based multi-objective optimization method was used to calculate the Pareto optimal solutions. Different weights were assigned for different road level to obtain the corresponding control gains. Simulation results show that the as-proposed adaptive control strategy can achieve the balance between ride comfort and control stability for varying road levels.

**Key words :** suspension semi-active control ; multi-objective optimization ; road classification ; ride comfort ; control stability

车辆悬架系统具有降低车辆乘员处震动,保持与路面接触并传递路面输入力与力矩的作用,悬架参数选取直接决定了悬架动力学性能<sup>[1-2]</sup>. 为进一步改善、协调不同频率区间内的悬架平顺性与操纵稳定性,研究人员提出了可控悬架的概念<sup>[3]</sup>. 根据悬架系统能量消耗进行区分,车辆可控悬架可以划分为主动悬架和半主动悬架两类. 与主动悬架相比,半主动悬架主要通过调节可调阻尼器的参数改变系统输入阻尼力,具有能量消耗少、系统复杂度低、稳定性高的优点,近年来得

到了广泛研究与应用.

在半主动悬架控制方面,Karnopp 等首先提出了天棚控制的概念<sup>[4]</sup>. 作为应用最为广泛的半主动悬架算法,天棚控制能够实现抑制簧载质量振动,进而提升平顺性的控制目标. 针对天棚控制增益的选取,大量文献进行了相关研究<sup>[5-7]</sup>,但研究结果显示,无论如何改变控制增益,天棚阻尼都会在改善平顺性的同时恶化车辆操纵稳定性<sup>[8-9]</sup>. 与此同时,对于控制增益对操纵稳定性的影响以及如何降低恶劣路面条件下操纵稳定性的

恶化程度的研究相对较少。另一方面,对于车辆悬架而言,系统输入为路面不平度激励。为达到更为理想的控制效果,将车辆可控悬架系统与路面识别进行结合成为了目前车辆可控悬架系统的研究重点与热点问题。但已有的研究成果中多假设路面条件已知或可准确感知,而对于如何针对可控悬架系统获取路面信息的研究相对较少。

本文针对天棚控制与路面识别的结合问题,提出了一种基于路面识别的悬架自适应天棚半主动控制方法。实现了平坦路面下侧重车辆平顺性,恶劣路面下改善操纵稳定性恶化程度的控制目标。

## 1 路面模型

国际标准化组织(ISO)制订的标准频域幂函数功率密度路面不平度模型如式(1)所示:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-W} \tag{1}$$

式中  $n_0$  为参考空间频率,  $0.1 \text{ m}^{-1}$ ;  $G_q(n_0)$  为参考空间频率下的功率谱密度,  $\text{m}^3$ ;  $W$  为频率指数,其取值决定了路面功率谱密度的频率结构。

式(1)中所示的功率谱密度表达式与实际路面功率谱密度相比,在低频部分存在高估现象。为解决这一问题,本文采用文献[10]提出的一种基于有理函数的路面功率谱密度表达形式:

$$G_q(n) = \frac{\alpha \rho^2}{\pi(\alpha^2 + n^2)} \tag{2}$$

式中  $n$  表示路面空间频率,  $1/\text{m}$ ;  $\alpha$  为路面特征常数,  $\rho$  表示路面不平度方差。 $\alpha$  及  $\rho$  的取值如表1所示<sup>[11]</sup>。基于式(2)的路面不平度时域模型可表达为<sup>[10]</sup>

$$\dot{q}(t) = -\alpha v q(t) + w(t) \tag{3}$$

式中  $q(t)$  为路面不平度,  $v$  为车速,  $w(t)$  为白噪声序列,其协方差为

$$\text{cov}[w(t)] = E[w(t)w(t+\tau)] = 2\rho^2\alpha v\delta(\tau) \tag{4}$$

其中  $\tau$  为时移,  $\delta(\cdot)$  为脉冲函数。

表 1 基于有理函数的路面模型参数 $\alpha$ $\rho$		
Table 1 Values of road model parameters $\alpha$ $\rho$		
路面级别	$\alpha/\text{m}^{-1}$	$\rho/\text{mm}$
A	0.111	37.7
B	0.111	75.4
C	0.111	150.8
D	0.111	301.6
E	0.111	603.2
F	0.111	1 206.4
G	0.111	2 412.8
H	0.111	4 825.6

## 2 1/4 车辆半主动悬架模型

在本文中,分别选取簧载质量加速度以及轮胎动载荷作为平顺性与操纵稳定性的评价标准<sup>[12-13]</sup>。半主动悬架系统的控制目标可简单表述为在悬架动行程约束下,使车辆簧载质量加速度与代表操纵稳定性的轮胎动载荷最小化。

### 2.1 等效天棚模型

传统的天棚阻尼系统如图1a所示,通过安装在车辆簧载质量与惯性参考之间的减振器,天棚阻尼系统能够有效降低簧载质量振动,从而改善系统平顺性。但考虑到簧载质量与惯性参考之间安装的减振器无法在实际应用中实现,可将簧载质量与惯性参考之间的减振器进行转化,得到等效天棚阻尼系统如图1b所示。

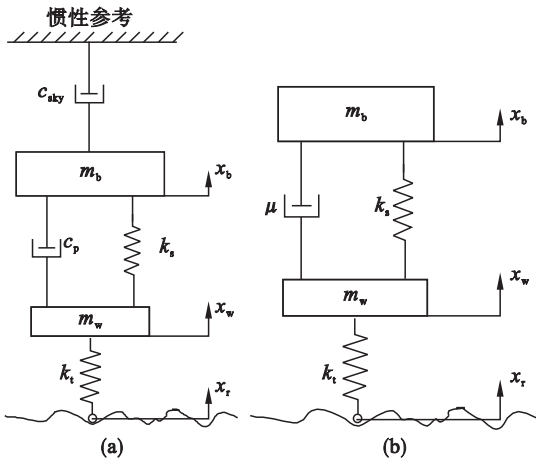


图 1 系统结构示意图  
Fig. 1 Schematic of system structure  
(a)—天棚阻尼;(b)—等效天棚阻尼。

分别对两个系统进行动力学模型建立,得到公式如下:

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + k_s(x_b - x_w) + c_p(\dot{x}_b - \dot{x}_w) + c_{sky}\dot{x}_b &= 0 \\ m_w \ddot{x}_w + m_b \ddot{x}_b + k_t(x_w - x_r) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + k_s(x_b - x_w) + \mu(\dot{x}_b - \dot{x}_w) &= 0 \\ m_w \ddot{x}_w + m_b \ddot{x}_b + k_t(x_w - x_r) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

由上述两方程可见,为达到改进型天棚系统与传统天棚系统的等效效果,需满足方程(7):

$$\mu(\dot{x}_b - \dot{x}_w) = c_p(\dot{x}_b - \dot{x}_w) + c_{sky}(\dot{x}_b) \tag{7}$$

即

$$\mu = c_p + \frac{c_{sky}(\dot{x}_b)}{(\dot{x}_b - \dot{x}_w)} \tag{8}$$

与传统天棚阻尼控制相似,等效天棚阻尼控制力  $F_d$  可通过式(9)表示:

$$F_d = \begin{cases} c_p(\dot{x}_b - \dot{x}_w) + c_{sky}(\dot{x}_b)(\dot{x}_b - \dot{x}_w)\dot{x}_b \geq 0; \\ c_{\min}(\dot{x}_b - \dot{x}_w), & (\dot{x}_b - \dot{x}_w)\dot{x}_b < 0. \end{cases} \quad (9)$$

同时,为保证等效天棚阻尼控制力输出不超过减振器最大出力及能量耗散约束<sup>[12]</sup>,等效天棚阻尼控制力输出  $F_d^{\text{output}}$  还需满足式(10):

$$F_d^{\text{output}} = \begin{cases} F_d^{\max}, & F_d \geq F_d^{\max}; \\ F_d, & F_d^{\max} > F_d \geq F_d^{\min}; \\ F_d^{\min}, & F_d^{\min} > F_d. \end{cases} \quad (10)$$

2.2 性能指标解析表达式

下面求取性能解析表达式.以路面高程为输入,可求得以下系统传递函数:

1) 车辆簧载质量加速度传递函数  $H(s)_{\dot{x}_b \sim x_r}$ :

$$H(s)_{\dot{x}_b \sim x_r} = \frac{X_b(s)}{X_r(s)} = \frac{c_p k_t s^3 + k_s k_t s^2}{A}. \quad (11)$$

2) 车辆动载荷传递函数  $H(s)_{f_D \sim x_r}$ :

$$H(s)_{f_D \sim x_r} = k_t \left( \frac{X_w(s)}{X_r(s)} - 1 \right) = k_t \frac{D}{A}. \quad (12)$$

3) 车辆动行程传递函数  $H(s)_{x_b - x_w \sim x_r}$ :

$$H(s)_{x_b - x_w \sim x_r} = \frac{X_w(s)}{X_r(s)} = \frac{-m_b k_t s^2 - k_t c_{sky} s}{A}. \quad (13)$$

式中:

$$A = m_w m_b s^4 + (m_w c_p + m_b c_p + m_w c_{sky}) s^3 + k_t k_s + (m_w k_s + m_b k_s + m_b k_t + c_p c_{sky}) s^2 + (k_t c_p + k_t c_{sky} + k_s c_{sky}) s,$$

$$D = -m_b m_w s^4 - (m_w c_p + m_b c_p + m_w c_{sky}) s^3 - (k_s m_b + k_s m_w + c_p c_{sky}) s^2 - k_s c_{sky} s.$$

将式(2)转化为时间频率功率谱密度:

$$f = v n, \quad (14)$$

$$G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n). \quad (15)$$

式中:  $v$  为车速,  $\text{m/s}$ ;  $G_q(n)$  表示路面空间功率谱密度,  $\text{m}^3$ ;  $G_q(f)$  表示路面空间功率谱密度,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ .

将式(14)、式(15)代入式(2)可得

$$G_q(f) = \frac{\alpha v p^2}{\pi[(\alpha v)^2 + f^2]}. \quad (16)$$

对于平稳且各态历经的过程,若已知过程的功率谱密度,则变量的方差可通过式(17)计算<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_p(\omega) d\omega. \quad (17)$$

对应于式(11)~式(13)所述的系统输出,假设频响函数  $H(j\omega)_{p \sim x_r}$  表示输出  $p$  与路面输入之间的关系( $p=1, 2, 3$ ),则输出的功率谱密度可表达为

$$S_p(\omega) = |H(j\omega)_{p \sim x_r}|^2 S_{x_r}(j\omega). \quad (18)$$

为求得某一输出的方差,需要根据式(17)、式(18)进行计算.对于可以改写为式(19)形式的功率谱密度表达式,式(18)的解存在固定表达式.

$$S_p(\omega) = \frac{N_{k-1}(j\omega) N_{k-1}(-j\omega)}{D_k(j\omega) D_k(-j\omega)} \rightarrow$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_{k-1}(j\omega) N_{k-1}(-j\omega)}{D_k(j\omega) D_k(-j\omega)} d\omega. \quad (19)$$

式中:  $k$  表示多项式次数,  $N(\cdot)$  及  $D(\cdot)$  可通过式(20)、式(21)表示:

$$N_{k-1}(j\omega) = n_{k-1}(j\omega)^{k-1} + n_{k-2}(j\omega)^{k-2} + \dots + n_0, \quad (20)$$

$$D_k(j\omega) = d_k(j\omega)^k + d_{k-1}(j\omega)^{k-1} + \dots + d_0. \quad (21)$$

对路面功率谱密度表达式(16),可表示为

$$G_q(f) = \frac{\alpha v p^2}{\pi[(\alpha v)^2 + f^2]} \rightarrow$$

$$S_{x_r}(j\omega) = \frac{\alpha v p^2}{\pi} \frac{1}{(\alpha v + j\omega)(\alpha v - j\omega)}. \quad (22)$$

而对上文中提及的  $|H(j\omega)_{p \sim x_r}|^2$ ,可改写为式(23)的形式:

$$|H(j\omega)_{p \sim x_r}|^2 = H(j\omega)_{p \sim x_r} H(-j\omega)_{p \sim x_r}. \quad (23)$$

对于本系统,计算可知  $k=5$ ,则式(17)的解可表示为<sup>[1]</sup>

$$\sigma^2 = \frac{(n_4^2 c_{m0} + (n_3^2 - 2n_2 n_4) c_{m1} + n_{m0} c_{m2} + 2d_0(d_1 c_{m4} - d_3 c_{m3} + d_5 c_{m2})) + (n_1^2 - 2n_0 n_2) c_{m3} + n_0^2 c_{m4}}{2d_0(d_1 c_{m4} - d_3 c_{m3} + d_5 c_{m2})}. \quad (24)$$

式中:

$$n_{m0} = n_2^2 - 2n_1 n_3 + 2n_0 n_4, \quad c_{m0} = (d_3 c_{m1} - d_1 c_{m2})/d_5; \\ c_{m1} = -d_0 d_3 + d_1 d_2; \quad c_{m2} = -d_0 d_5 + d_1 d_4; \\ c_{m3} = (d_2 c_{m2} - d_4 c_{m1})/d_0, \quad c_{m4} = (d_2 c_{m3} - d_4 c_{m2})/d_0.$$

将式(22)及式(23)代入式(24),能够得到对应于车辆簧载质量加速度、动载荷以及动行程方差的解析表达式,三个表达式为路面等级、车速以及两个控制增益的函数.悬架控制增益选取问题转变为有约束的多目标函数优化求解问题.

3 多目标优化

2.2 节得到的多目标优化问题可表达如式(25):

$$\text{最小化 } f_1(c_p, c_{sky}) = \sigma_{\dot{x}_b}^2;$$

$$f_2(c_p, c_{sky}) = \sigma_{f_D}^2;$$

$$\text{约束条件 } 6 \cdot |\sigma_{x_b - x_w}| \leq \lim(x_b - x_w); \quad (25)$$

$$1\,000(\text{Nm/s}) \leq c_p \leq 3\,000(\text{Nm/s});$$

$$0(\text{Nm/s}) \leq c_{sky} \leq 5\,000(\text{Nm/s}).$$

式中:  $\sigma_{\dot{x}_b}^2$ 、 $\sigma_{f_D}^2$  分别表示车辆簧载质量加速度及轮胎动载荷方差;  $\lim(x_b - x_w)$  表示车辆极限动行程

( 动行程限位约束 ) 本文中选为 150 mm.

为寻找式( 25 )中提出的多目标优化问题的 Pareto 最优解集 ,本文使用基于遗传算法的多目标优化算法 :NSGA - II<sup>[ 15 ]</sup>. 为说明 Pareto 最优解的特性 ,在 D 级路面、车速 40 km/h 的条件下依据式( 25 )求解. 图 2 为计算得到的 Pareto 最优解集. 由图可见 ,应用 NSGA - II 求得的 Pareto 最优解均匀分布于可行解域左下方 ,具有较好的分布多样性. 需要说明的是 ,由于遗传算法初始种群为随机生成 ,因此每次计算得到的 Pareto 最优解集有所不同. 但由于解集近似均匀分布于 Pareto 最优前沿 ,因此每次运算得到的目标函数值相差不大. 在获得系统 Pareto 最优前沿后 ,即可通过系统在不同行驶条件( 路面等级 )下的不同侧重选取相应的控制增益.

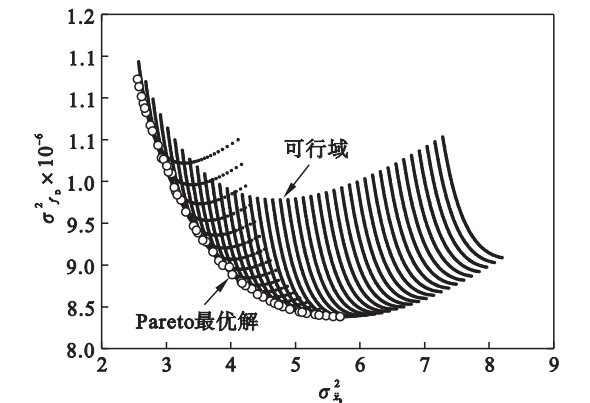


图 2 目标函数可行域与 Pareto 最优前沿仿真结果  
Fig. 2 Simulation results of the objective space and Pareto optimal front

## 4 路面识别算法

由上文可见 ,利用多目标优化方法能够得到不同路面与车速条件下的 Pareto 最优前沿. 考虑到车速信号在车辆行驶中可直接获取 ,则为进行半主动控制增益调节 ,需要进行路面等级识别.

考虑到本文所提出的控制方法仅需感知路面等级 ,下面介绍一种以簧载加速度信号作为判断依据 ,通过小波变换及自适应神经网络 ( ANFIS )实现的路面等级识别方法<sup>[ 16 ]</sup>.

本文使用的路面等级识别的整体流程图如图 3 所示. 识别过程描述如下 :①加速度信号获取. 利用安装于车辆簧载质量处的加速度传感器采集加速度信号 ,为防止出现信号混叠现象 ,对加速度信号进行低通滤波. ②信号计算. 对获得的加速度时域信号进行三层小波变换 ,选取得到的 3 个逼近信号及第一细节信号连同原始时域信号作为包

含加速度时频域信息特征的信号集合. ③特征提取. 计算全部 11 个特征量 ,并利用改进的距离评估技术选取敏感特征. ④第一层 ANFIS 分类. 以特征计算步骤得到的 5 个信号的敏感特征作为输入 ,路面等级作为输出进行初步分类. ⑤第二层 ANFIS 分类. 以第一层 ANFIS 分类得到的 5 个初步路面等级作为输入 ,输出最终的路面等级.

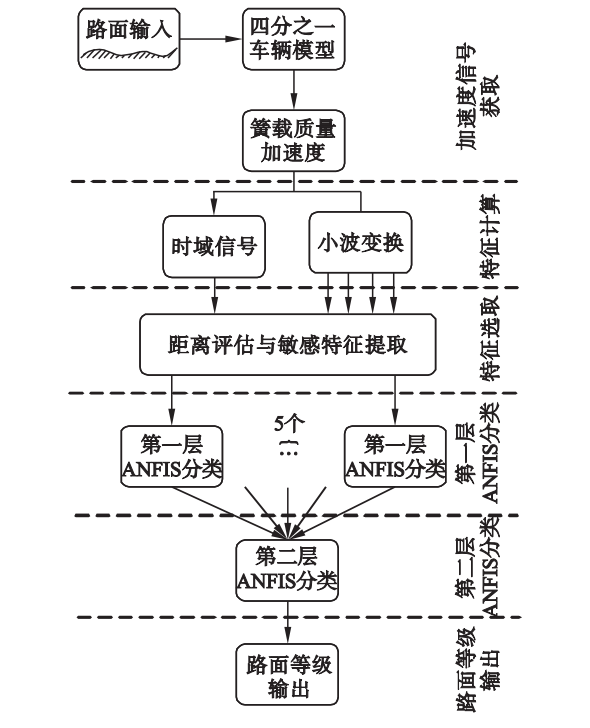


图 3 路面分级流程图  
Fig. 3 Flow chart for road classification

## 5 系统仿真

本文所使用的半主动悬架控制策略如图 4 所示. 控制策略由两部分构成 :路面识别及半主动悬架控制. 路面识别部分根据簧载加速度信号进行路面等级判断 ,输入半主动悬架控制模块 ,然后根据路面等级选取悬架控制增益 ,并计算理论输出阻尼力 ,通过约束比较得到实际输出阻尼力. 在下文仿真过程中 ,为便于比较 ,设定车辆行驶速度为 40 km/h ,仿真采样频率为 100 Hz. 系统仿真悬架系统参数见表 2. 根据式( 25 )离线求解得到不同路面等级下的权重及控制增益见表 3. 权重分配基本原则如下<sup>[ 7 ]</sup> :路面较差时 ,路面激励输入能量较大 ,使车辆轮胎动载荷响应增加 ,应更为注重轮胎动载荷控制 ,因此  $w_{tire}$  相对较大 ,而当路面较好时 ,由于轮胎动载荷大于静载荷的概率相对较小 ,应选取较大的  $w_{acc}$  ,使车辆平顺性提升.

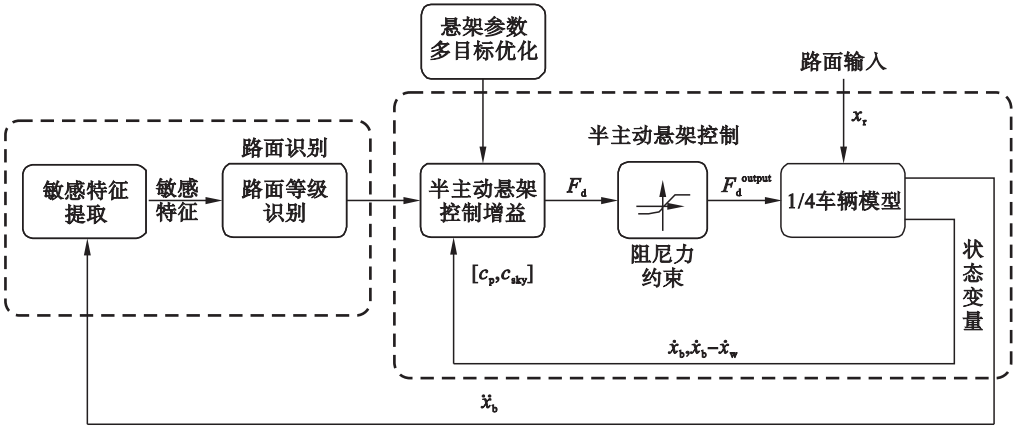


图 4 半主动悬架控制策略结构图  
Fig. 4 Control strategy of semi-active suspension system

表 2 车辆仿真参数  
Table 2 Simulation parameters of quarter vehicle

$m_b/\text{kg}$	$m_w/\text{kg}$	$k_t/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_p/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_{\min}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
256	30	186 000	22 000	2 000	600

表 3 不同路面对应权重及阻尼系数  
Table 3 Weight and damping coefficients for different road levels

路面等级	权重值 $[w_{\text{acc}}, w_{\text{tire}}]$	阻尼系数 $[c_p, c_{\text{sky}}]$
好 (A, B 级)	$[0.8, 0.2]$	$[1020, 3670]$
较好 (C, D 级)	$[0.6, 0.4]$	$[1290, 2560]$
较差 (E, F 级)	$[0.4, 0.6]$	$[1520, 1310]$
差 (G, H 级)	$[0.2, 0.8]$	$[1780, 920]$

仿真中使用的路面时域信号如图 5 所示。图中路面时域信号由五段组成，依次为 B、D、E、F 以及 C 级路面。每段路面条件下车辆行驶时间为 20 s。以 1 s 作为识别间隔，得到路面等级识别结果如图 6 所示。随激励路面等级升高，输出的等级相对误差有所增加，但识别的输出等级结果仍全部集中于对应等级附近，说明本文提出的路面识

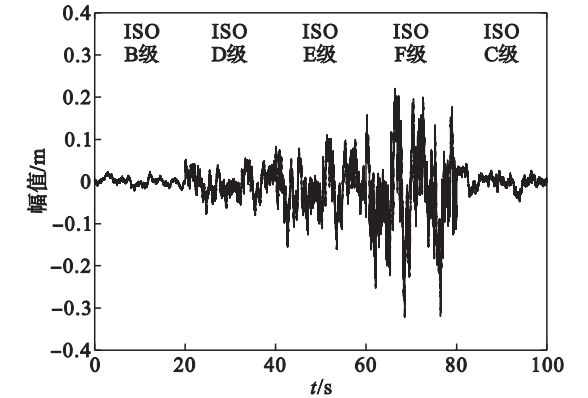


图 5 路面激励时域信号  
Fig. 5 Road profile in time domain

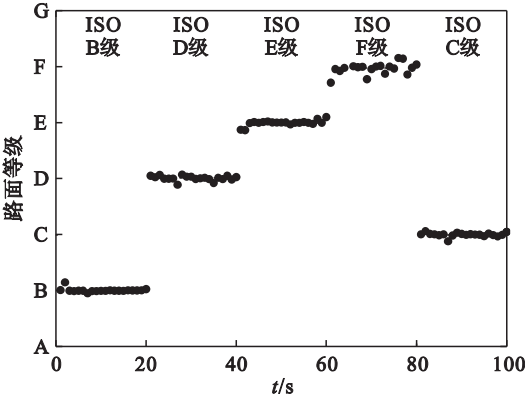


图 6 路面等级识别结果  
Fig. 6 Classification result for the generated road profile

别方法能够准确识别路面等级。

在识别得到激励路面等级后，根据表 3 所示的控制增益调节系统阻尼力输出。基于图 5 路面激励得到的簧载质量加速度及轮胎动载荷均方根值见表 4。由表可见，随路面条件恶化，车辆簧载质量加速度及轮胎动载荷均方根值均升高。与被动悬架系统相比，基于本文方法得到的半主动悬架系统能够有效改善车辆簧载质量加速度，但同时轮胎动载荷均方根值高于被动悬架系统，即车辆操纵稳定性有所恶化。通过针对不同路面条件调整控制权重，能够有效改变半主动控制效果，在降低平顺性改善程度的同时，使悬架系统操纵稳定性改善程度得到提高。

表 4 平顺性与操纵稳定性对比  
Table 4 Comparison of ride comfort and road handling

路面等级	簧载质量加速度均方根值/( m·s <sup>-2</sup> )		改善程度/%	轮胎动载荷均方根值/N		改善程度/%
	被动	半主动		被动	半主动	
B( 好 )	0.658	0.471	28.4	242.7	270.9	-11.6
D( 较好 )	2.631	1.958	25.6	970.8	1060.3	-9.22
E( 较差 )	5.261	3.965	23.7	1941.8	2078.8	-7.07
F( 较差 )	10.523	8.012	23.8	3883.6	4155.6	-7.01
C( 较好 )	1.315	0.982	25.3	485.4	530.2	-9.24

6 结 论

本文基于路面识别进行了车辆半主动悬架控制研究. 根据天棚阻尼控制推导得到车辆簧载质量加速度及轮胎动载荷的解析表达式 ;进而利用多目标求解方法 NSGA – II 求得不同行驶条件下的悬架控制增益 ;行驶过程中的路面激励等级通过簧载质量加速度进行识别得到. 仿真结果表明 ,文中提出的路面分级方法能够快速准确识别路面等级 ,基于文中方法得到的车辆半主动悬架系统能够根据路面等级自适应改变悬架控制增益 ,改善了传统天棚阻尼控制算法在恶劣路面条件下无法有效降低轮胎动载荷的不足 ,达到了在不过度降低车辆平顺性改善程度的前提下提升车辆操纵稳定性的控制目标.

参考文献：

[ 1 ] Gobbi M ,Mastinu G. Analytical description and optimization of the dynamic behavior of passively suspended road vehicles [ J ]. *Journal of Sound and Vibration* ,2001 ,245 ( 3 ) : 457 – 481.

[ 2 ] 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. )

[ 3 ] Aly A A ,Salem F A. Vehicle suspension systems control : review[ J ]. *International Journal of Control Automation and Systems* 2013 ,2( 2 ) :46 – 54.

[ 4 ] Karnopp D ,Crosby M J ,Harwood R. Vibration control using semi-active force generators[ J ]. *Journal of Engineering for Industry* ,1974 ,96( 2 ) :619 – 626.

[ 5 ] Caponeto R ,Diamente O ,Fargione G et al. A soft computing approach to fuzzy sky-hook control of semiactive suspension [ J ]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* ,

2003 ,11( 6 ) :786 – 798.

[ 6 ] Nguyen L H ,Hong K S ,Park S. Road-frequency adaptive control for semi-active suspension systems[ J ]. *International Journal of Control ,Automation ,and Systems* ,2010 ,8( 5 ) : 1029 – 1038.

[ 7 ] Hong K S ,Sohn H C ,Hedrick J K. Modified skyhook control of semi-active suspensions :a new model gain scheduling and hardware-in-the-loop tuning [ J ]. *Journal of Dynamic Systems , Measurement , and Control* , 2002 , 124 ( 1 ) : 158 – 167.

[ 8 ] Sankaranarayanan V ,Emekli M E ,Gilvenc B ,et al. Semiactive suspension control of a light commercial vehicle [ J ]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* ,2008 ,13 ( 5 ) :598 – 604.

[ 9 ] Ahmadian M ,Pare C A. A quarter-car experimental analysis of alternative semiactive control methods[ J ]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* ,2000 ,11( 8 ) : 604 – 612.

[ 10 ] Michelberger P ,Palkovics L ,Bokor J. Robust design of active suspension system [ J ]. *International Journal of Vehicle Design* ,1993 ,14( 2/3 ) :145 – 165.

[ 11 ] Wu Z C ,Chen S Z ,Yang L ,et al. Model of road roughness in time domain based on rational function [ J ]. *Transactions of Beijing Institute of Technology* 2009 ,29( 9 ) :795 – 798.

[ 12 ] 米奇克 M. 汽车动力学[ M ]. 北京 :清华大学出版社 ,2009.

( Mitschke M. Vehicle dynamics [ M ]. Beijing :Tsinghua University Press ,2009. )

[ 13 ] Youn I ,Hac A. Semi-active suspensions with adaptive capability[ J ]. *Journal of Sound and Vibration* ,1995 ,180 ( 3 ) :475 – 492.

[ 14 ] Mcgillem C D ,Cooper G R. Probabilistic methods of signal and system analysis[ M ]. Oxford :Oxford University Press , 1986.

[ 15 ] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [ M ]. Chichester :John Wiley & Sons Chichester , 2001.

[ 16 ] Qin Y C , Dong M M , Zhao F , et al. Road profile classification for vehicle semi-active suspension system based on adaptive neuro fuzzy inference system[ C ]// 54th IEEE Conference on Control and Decision. Osaca ,2015 :1533 – 1538.