

滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真

殷琚^{1,2}, 陈辛波^{1,2}, 吴利鑫^{1,2}, 刘怡伶^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要: 为合理模拟路面时域模型,通过路面不平度空间功率谱密度分析路面频域模型,并由路面频域模型推导路面时域模型的滤波白噪声数值模拟方法,提出了采用滤波白噪声方法模拟路面时域模型时,改变仿真车速的同时需调整白噪声采样频率使之与车速相配。通过分析生成的路面时域模型的空间功率谱密度,验证了路面时域模型的准确性。比较只改变车速和所提出的改变车速并调整相应白噪声采样频率模拟的路面时域模型的高度历程、频谱和空间功率谱密度,得到了后者模拟方法更符合标准等级路面的结论。并通过仿真,分析比较了某1/4车辆悬架模型在不同方法生成的路面时域模型输入下的系统响应精确性,体现了所提方法的重要性。

关键词: 路面不平度; 路面时域模型; 滤波白噪声; 悬架性能分析

中图分类号: U416.26

文献标志码: A

Simulation Method of Road Excitation in Time Domain Using Filtered White Noise and Dynamic Analysis of Suspension

YIN Jun^{1,2}, CHEN Xinbo^{1,2}, WU Lixin^{1,2}, LIU Yiling^{1,2}

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to simulate road excitation in time domain appropriately, an analysis was first made on the road excitation in frequency domain based on power spectral density (PSD) of road excitation in spatial frequency. Then a numerical simulation method of road excitation in time domain was derived using filtered white noise. Based on a road excitation simulation in time domain with the filtered white noise method, the sampling frequency of white noise was proposed to be adjusted to the change of the vehicle speed. By analyzing PSD of the generated road excitation in spatial frequency, the generated road excitation in time domain was

verified. A comparative study of the road excitation in time domain, and the spectrum as well as the PSD of the road excitations in spatial frequency generated by changing vehicle speed only and that by changing vehicle speed together with the adjusted sampling frequency of white noise show that the latter method agrees well with the standard road classification. A quarter car suspension dynamic performance was simulated with the road excitations generated by different methods, the system response accuracies were compared and analyzed, and thus the importance of the proposed method was validated.

Key words: road surface roughness; road excitation in time domain; filtered white noise; dynamic analysis of suspension

路面激励(即路面不平度)用于描述路面起伏的程度,作为汽车行驶过程中的主要激励,其精确程度影响着汽车振动分析结果的准确性。在国内外大量对路面不平度的有益研究下,多种时域和频域的路面模型被提出^[1]。如果基于线性系统的假设研究汽车平顺性,可于频域内进行系统动力学研究,方便且直观地建立系统输入—响应的频域模型,从而得到汽车的随机振动及其平顺性分析计算结果^[2]。实际上,非线性刚度弹簧、非线性阻尼减振器等汽车振动系统中的非线性元件,常需采用非线性振动模型,以获得准确的分析结果^[3]。时域分析是非线性系统最基本的分析方法。近年来,学者越来越重视研究主动、半主动悬架的控制策略,而主动、半主动悬架控制系统的反馈信号是时域信号,所以在进行控制策略研究时,常在时域中进行。目前,国内外进行道路时域建模的方法主要有:谐波叠加法、滤波白噪声法、逆傅里叶变换法和时间序列模型法^[4]。其中,滤波白噪声法是目前普遍应用的路面不平度模拟方法。

收稿日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51375344, U1564207)

第一作者: 殷琚(1987—),男,博士生,主要研究方向为主动悬架和轮边电驱动系统。E-mail: yinjun@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈辛波(1962—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为汽车底盘和轮边电驱动系统。E-mail: austin_1@163.com

现有研究对比了积分白噪声法和以其为基础的滤波白噪声法差异,并得到滤波白噪声法在工程实践中更实际的结论^[5-6]。基于滤波白噪声法生成的路面时域模型,分析了主动悬架在全车模型上的控制性能^[7],研究了用于主动悬架的参数自优化的控制器^[8],研究了前后路面输入与时间相关时的主动悬架控制策略^[9],分析了卡尔曼滤波对状态变量估计的精确程度和轴距预瞄的优化潜力^[10]。但这些研究仅给出了滤波白噪声法的公式表达,没有描述具体适用方法,也没有提到车速与白噪声采样频率之间的关系。有研究基于 Matlab/Simulink 的滤波白噪声法,提出“Simulink 中的有限带宽白噪声模块输出的并非按照所设置的噪声强度输出,其采样时间参数对输出强度有很大影响。仿真时间需要根据车速进行调整,保证在各车速下仿真车辆驶过的路面长度基本一致”^[11]。但是没有给出准确描述、具体原因和解决方法。在工程实际中,对于给定路面模型,不同车速下的路面时域输入信号,其信号幅值不变,而输入频率改变。但对于滤波白噪声公式的应用,研究中^[12-14]改变车速仅改变路面模型的幅值,并不改变路面时域输入信号的频率。因而基于该路面时域模型的研究^[15-16],在不同车速下仿真得到的车辆振动系统响应特性,仅呈与车速相关的比例关系,与振动系统固有频率特性无关。则不同车速下的仿真分析,由该滤波白噪声法生成的路面时域模型,无法反映车辆振动系统的固有频率特性。

本文介绍了采用滤波白噪声法模拟路面时域模型的正确适用方法,及反推并与标准对比验证的方法。

1 滤波白噪声路面时域数值模拟

路面不平度指道路表面对于理想平面的偏离程度,它影响车辆行驶时的动力性、舒适性和安全性^[17]。路面功率谱密度常用于描述路面不平度的统计特性。

1.1 路面不平度的空间功率谱密度

国际标准 ISO 8608 和国家标准 GB 7031-86 建议路面功率谱密度 $G_q(n)$ (此路面功率谱密度为单边功率谱密度^[18]) 的拟合表达式为

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

式中: $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数,是参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度值,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{m} = \text{m}^3$; n 表示每 m 长度中包含几个波长,是波长的倒数,称为空

间频率(m^{-1}); n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; W 表示双对数坐标上斜线的斜率,它决定路面功率谱密度的结构,称为频率指数。

同时,按路面功率谱密度把路面不平度分为 8 级,如表 1 所示,并列出了 $0.011 \text{ m}^{-1} < n < 2.83 \text{ m}^{-1}$ 范围路面不平度相应的均方根值 $q_{\text{rms}}(\sigma_q)$ 的几何平均值^[19]。

一般情况下,路面不平度的数值范围为:波长 $\lambda = 0.1 \sim 100 \text{ m}$,幅值 $A = 1 \sim 200 \text{ mm}$,路面不平度分级如图 1 所示。

表 1 路面不平度 8 级分类标准

路面等级	不平度分级			
	$G_q(n_0)/10^{-6} \text{ m}^3, n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$		$q_{\text{rms}}(\sigma_q)$ $0.011 \text{ m}^{-1} < n < 2.83 \text{ m}^{-1}$	
	下限	几何平均值	上限	几何平均值
A	8	16	32	3.81
B	32	64	128	7.61
C	128	256	512	15.23
D	512	1 024	2 048	30.45
E	2 048	4 096	8 192	60.90
F	8 192	16 384	32 768	121.80
G	32 768	65 536	131 072	243.61
H	131 072	262 144	524 288	487.22

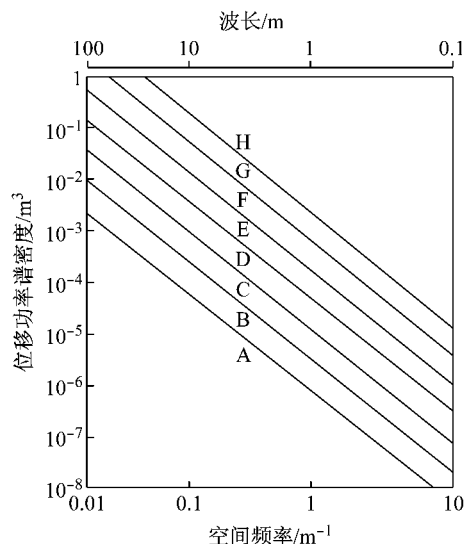


图 1 路面不平度分级图^[18]

Fig.1 Diagram of road roughness classification^[18]

1.2 路面不平度的时间功率谱密度

路面不平度是汽车振动系统的输入,其时间功率谱密度除了与空间功率谱密度相关,还与车速相关。

若汽车以某速度 $u(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 驶过空间频率为 n 的不平路面, n 与 u 的乘积即为路面输入的时间频

率 f , 也即

$$f = un \quad (2)$$

空间频率功率谱密度可以表示为

$$G_q(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\sigma_{q \sim \Delta n}^2}{\Delta n} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{q \sim \Delta n}^2$ 为路面功率谱密度在频带 Δn 内包含的功率。

当汽车行驶速度为 u 时, 其空间频带 Δn 相应的时间频带 Δf 内所包含的不平度垂直位移 q 的谱量成分相同, 其功率仍为 $\sigma_{q \sim \Delta n}^2$. 因此, 时间功率谱密度可用式表示

$$G_q(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\sigma_{q \sim \Delta f}^2}{\Delta f} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\sigma_{q \sim \Delta n}^2}{u \Delta n} = \frac{1}{u} G_q(n) = \frac{1}{u} G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} = G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{f^2} \quad (4)$$

式(4)表明路面不平度时间功率谱密度与参考空间频率下的路面功率谱密度 $G_q(n_0)$ 和车速均成正比. 由式(4)可得时间频率的路面不平度垂直速度功率谱密度为

$$G_q(f) = (2\pi f)^2 G_q(f) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 u \quad (5)$$

式(5)表明, 路面不平度垂直速度功率谱密度在整个频率范围内为一常数, 与频率没有关系, 其特性与白噪声功率谱特性一致, 故路面不平度垂直速度输入可用白噪声模拟, 即路面不平度垂直位移输入可用积分白噪声模拟。

1.3 滤波白噪声模型

假设某线性系统采用单位强度为 1 的高斯白噪声 w 作为系统输入, $H(j\omega)$ 作为其频响函数, 路面不平度位移 z_g 为其系统输出. 若采用该线性系统描述以功率谱密度描述的路面不平度位移输入, 则

$$G_q(\omega) = |H(j\omega)|^2 G_w(\omega) \quad (6)$$

式中: $G_q(\omega)$ 为路面位移输入的功率谱密度; $G_w(\omega) = \frac{G_w(f)}{2\pi}$ 为白噪声的功率谱密度; $G_w(f)$ 取值为 1; $|H(j\omega)|$ 为频响函数 $H(j\omega)$ 的模。

用圆频率 ω 表示 $G_q(f)$, 式(4)可表示为

$$G_q(\omega) = \frac{G_q(f)}{2\pi} = \frac{G_q(n_0) n_0^2 u}{2\pi \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2} = \frac{2\pi G_q(n_0) n_0^2 u}{\omega^2} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得

$$|H(j\omega)|^2 \frac{G_w(f)}{2\pi} \Big|_{G_w(f)=1} = \frac{2\pi G_q(n_0) n_0^2 u}{(\omega)^2} \quad (8)$$

由此可得

$$H(j\omega) = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u}}{j\omega} \quad (9)$$

则

$$H(s) = \frac{Z_g(s)}{W(s)} = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u}}{s} \quad (10)$$

可得

$$sZ_g(s) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u} W(s) \quad (11)$$

由式(11)可得

$$\dot{z}_g(t) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u} w(t) \quad (12)$$

式(12)即为积分白噪声形式的路面时域模型。

由于路面谱在低频范围内近似为水平, 可在路面不平度模型中引入下截止频率 f_0 , 则

$$G_q(f) = G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{(f + f_0)^2} \quad (13)$$

可得频响函数为

$$H(j\omega) = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u}}{j\omega + \omega_0} \quad (14)$$

即可得滤波白噪声路面不平度时域模型为

$$\dot{z}_g(t) = -2\pi f_0 z_g(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u} w(t) \quad (15)$$

通过改变公式中的车速 u , 可得各车速下的路面时域模型, 该滤波白噪声模型被广泛应用, 但其模拟的路面不够真实理想。

实际中, 路面不平度下截止频率应为空间频率, 而非时间频率. 下截止时间频率可通过下截止空间频率与车速求得, 则滤波白噪声路面不平度时域模型为

$$\dot{z}_g(t) = -2\pi n_1 u z_g(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u} w(t) \quad (16)$$

式中, 路面不平度下截止空间频率 n_1 为 0.01 m^{-1} , 即对应最大路面波长 $A=100 \text{ m}$ 。

2 基于 Matlab 的滤波白噪声路面时域模拟方法

以 Matlab/Simulink 环境下仿真为例介绍两种滤波白噪声模拟路面时域模型的方法和本文所提方法, 并介绍 Matlab M 文件编程时应考虑的因素。

在 Matlab/Simulink 环境下, 搭建与公式或公式一致的仿真程序, 其仿真块图如图 2 所示, 包括一个限带白噪声模块, 两个增益器, 一个积分器和一个路面时域模型观察窗. 其中, 由式(15)可知, 增益模块 $K_1 = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u}$, 增益模块 $K_2 = 2\pi f_0$; 由式(16)可知, 增益模块 $K_1 = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u}$, 增益模块 $K_2 = 2\pi n_1 u$ 。

在通常的仿真中^[12-16], 采用式(15), 根据标准中

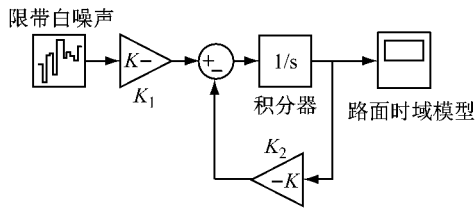


图2 路面不平度时域模拟仿真模型

Fig.2 Simulation model of road roughness in time domain

不同的路面等级改变增益中的 $G_q(n_0)$ 并根据不同仿真车速改变 u , 以模拟不同路面等级和不同仿真车速条件下的路面时域模型。由于不考虑限带白噪声采样频率, 为举例对比, 统一取 $f_{s1} = 100$ Hz 的限带白噪声采样频率。该方法简称为“方法一”。

采用式(16), 根据标准中不同的路面等级改变增益中的 $G_q(n_0)$ 并根据不同仿真车速改变 u , 以模拟不同路面等级和不同仿真车速条件下的路面时域模型。本文仿真中统一取 $f_{s2} = 100$ Hz 的限带白噪声采样频率。该方法简称为“方法二”。

值得注意的是, 在该仿真模型中, 除了与标准对应的 $G_q(n_0)$ 和与仿真车速对应的 u , 限带白噪声模块的三个设置(噪声功率、采样频率和种子)对仿真结果影响很大。在如图2所示路面时域模型仿真中, 需要一个单边功率谱密度为1的限带白噪声输出, 但 Matlab/Simulink 的限带白噪声模块假设的是双边功率谱^[20], 因此限带白噪声的噪声功率谱密度应设置为0.5(限带白噪声模块的噪声功率设置能保证不同采样频率下白噪声的信号功率为设定值)。限带白噪声模块的采样时间设置为 $\frac{1}{10u}$, 其中车速 u 的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 该采样频率确保1 s内以车速 u 行驶过的路程内, 包含 $10u$ 个采样点, 也即每1 m路程内, 有10个采样点, 与标准规定的最大空间频率 $n = 10 \text{ m}^{-1}$ 相一致。限带白噪声模块的种子设置与起始随机数字发生器相关, 保持默认即可。采用式(16)并结合该设置以仿真时域路面的方法, 该方法简称“方法三”。

由于限带白噪声模块采样频率一经设置, 在单次仿真中不可改变, 因此在一次仿真中无法实现不同车速工况的仿真。如需要进行不同车速下的仿真, 可按照方法三, 首先生成一段足够长的路面时域模型, 并保存至 workspace, 再通过编程, 实现不同车速下的路面输入。

若需要在 Matlab M 文件中生成路面时域模型, 应确保用于生成路面时域模型的随机信号的均值为

0, 功率谱密度为1, 且生成频率大小为 $10u$, 再通过公式生成路面时域模型。

3 三种滤波白噪声模拟方法比较

基于标准规定的C级路面, 比较滤波白噪声路面时域模型两种常用生成方法和本文所提方法的差异。

3.1 路面高度历程比较

采用方法一和方法二分别生成1, 5, 20 和 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速下的C级路面时域模型, 得到各车速下4 s内的路面高度历程, 如图3~图4所示。

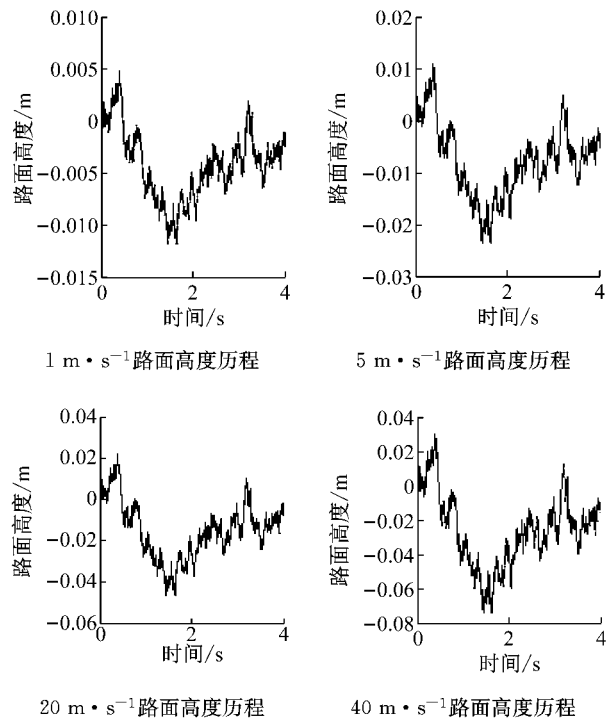


图3 方法一:不同车速运行4 s的路面高度历程

Fig.3 Method1: road excitations in different speed conditions running for 4 s

由图3可以看出, 采用方法一生成不同车速下的路面高度历程, 在相同时间段内, 其形状相似, 时间频率成分一致, 仅是幅值不同。但是, 因为车速不同, 4 s行驶过的路面实际对应了不同长度的路程。采用方法二生成不同车速下的路面高度历程与采用方法一的结果相似(如图4所示), 其路面高度历程形状类似但有所不同, 原因是不同车速下, 由空间截止频率推导得到的时间截止频率不同, 导致路面高度历程形状有微小差异。而且, 不同车速下的路面高度历程, 幅值范围并不相同。

采用方法三分别生成1, 5, 20 和 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速下80 m长度的C级路面时域模型, 如图5所示。

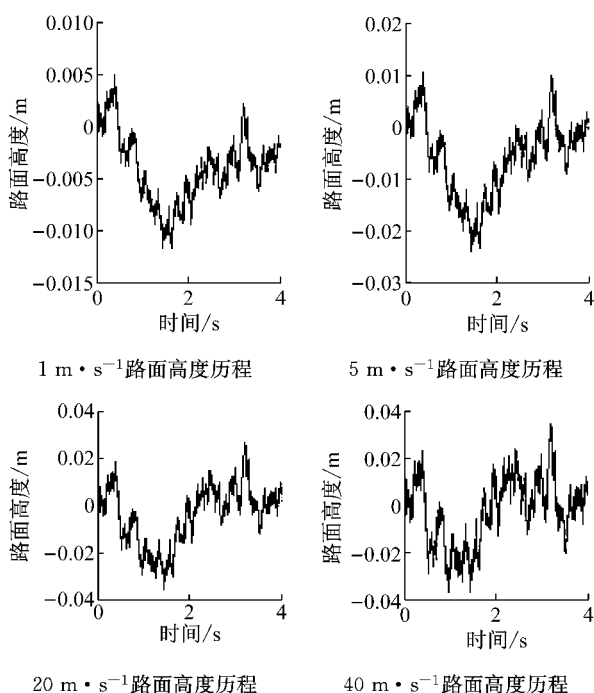


图 4 方法二:不同车速运行 4 s 的路面高度历程

Fig. 4 Method 2: road excitations in different speed conditions running for 4 s

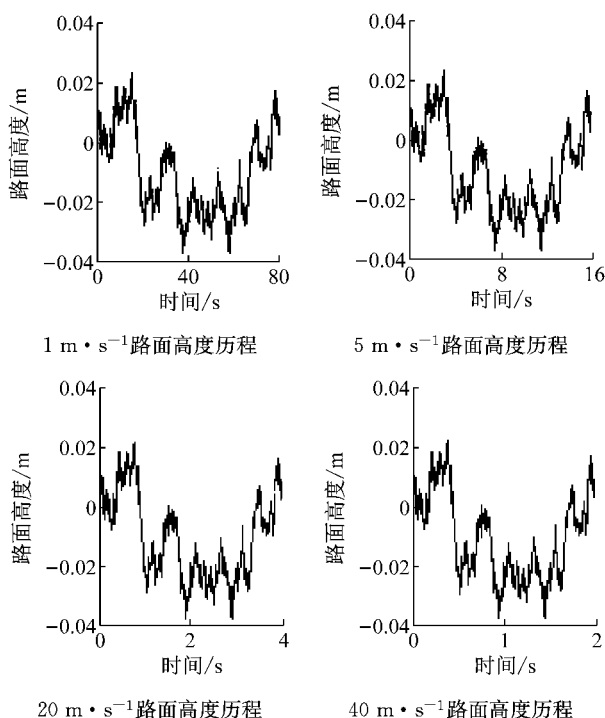


图 5 方法三:不同车速运行不同时间的路面高度历程

Fig. 5 Method 3: road excitations in different speed conditions running for different periods

由图 5 可以看出,采用方法三生成不同车速下的路面高度历程,在相同时间段内,其形状不同,时间频率成分不同.但是,不同车速下生成的 80 m 距离的路面高度历程的幅值完全一致.说明该方法生

成的路面高度历程,其空间状态与车速无关,且不同车速下,路面输入的时间频率成分也与车速成正比,符合真实情况.

3.2 频谱比较

采用 FFTW 方法^[21],比较分析三种方法生成的路面时域模型的频谱.由于在 Matlab 程序中进行的是离散快速傅里叶变换,为了让分析结果尽可能准确,需要注意两点:

(1) 路面时域模型的数据点数,应当与 2^N 尽可能接近但不大于 2^N ;

(2) 离散快速傅里叶变换中的采样频率,应当与白噪声输入的采样频率保持一致.

为了减少随机信号对仿真结果的影响,使仿真结果更加准确,通过仿真时间和白噪声采样频率的匹配,确保路面时域模型的数据点数为 2^{19} 个.由于在 Matlab/Simulink 仿真中采用了变步长算法,仿真结果的时间间隔可能并不对应白噪声采样频率,数据点数也可能与预计不同.应首先将仿真结果根据白噪声采样频率做线性插值,再用于离散快速傅里叶变换.

采用方法一和方法二生成的 1, 5, 20 和 40 m · s⁻¹ 车速下 C 级路面时域模型的频谱分别如图 6 和图 7 所示,频率坐标以 e 为底作为刻度,以使频谱图更为直观.

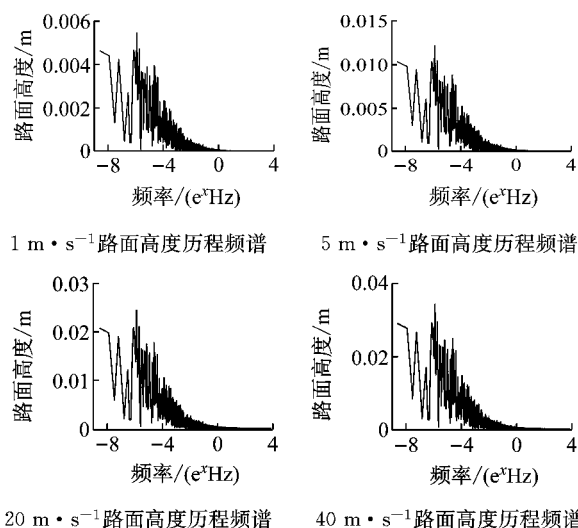


图 6 方法一:不同车速下路面时域高度历程频谱

Fig. 6 Method 1: amplitude frequency characteristics of road excitations in different speed conditions

由图 6 可以看出,采用方法一生成的不同车速下路面时域高度历程的频谱,其频率特性完全一致,仅是幅值发生变化,且幅值关系为 $\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{u_1}{u_2}}$. 而采用

方法二生成的不同车速下路面时域高度历程的频谱,其频率范围相似,幅值范围随着车速提高而减小,各车速下频谱没有明显规律,如图7所示。

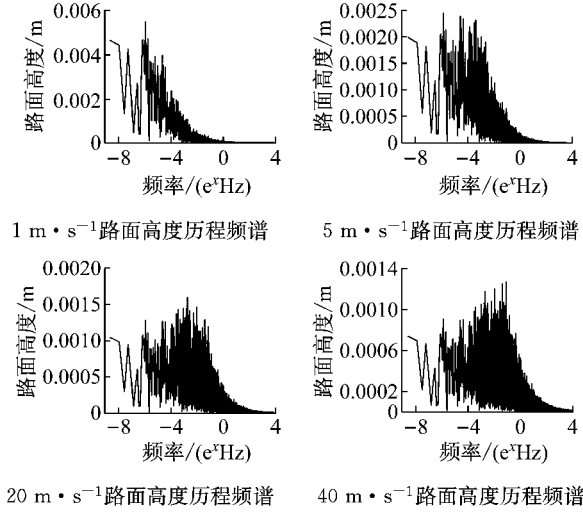


图7 方法二:不同车速下路面时域高度历程频谱

Fig.7 Method 2: amplitude frequency characteristics of road excitations in different speed conditions

采用方法三生成的1,5,20和40 m·s⁻¹车速下C级路面时域模型的频谱如图8所示。

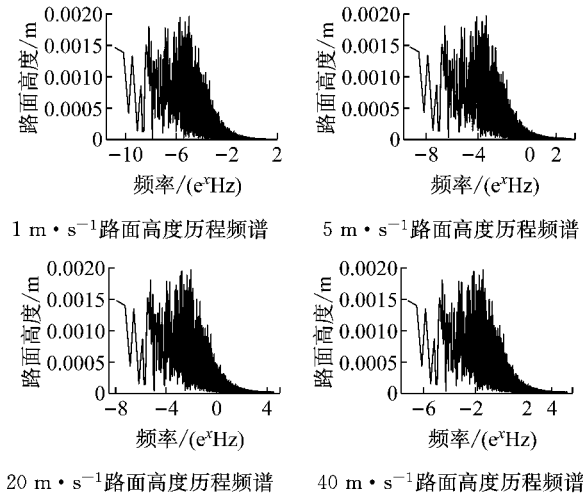


图8 方法三:不同车速下路面时域高度历程频谱

Fig.8 Method 3: amplitude frequency characteristics of road excitations in different speed conditions

由图8可看出,采用方法三生成的不同车速下路面时域高度历程的频谱,其幅值特性完全一致,而频率特性不同,且频率关系为 $\frac{f_1}{f_2} = \frac{u_1}{u_2}$,符合真实情况。

3.3 功率谱密度比较

滤波白噪声路面时域模拟方法用于模拟不同路面等级和不同车速下的路面时域模型时,其模拟的路面时域模型的空间频率特性,应当与相应标准路

面等级的空间频率特性一致。将仿真所得路面时域模型,采用Welch方法^[22],分析时间频率功率谱密度,并由式(2)和式(4)分别得到路面空间频率和路面空间功率谱密度。与频谱分析相同,为避免Matlab/Simulink变步长仿真的影响,计算功率谱密度前,需将仿真结果根据白噪声采样频率做线性插值。

采用方法一、方法二和方法三生成的1,5,20和40 m·s⁻¹车速下C级路面时域模型的空间功率谱密度如图9~图11所示。其中,两条红线表示C级路面位移功率谱密度的上限和下限。一般认为路面不平度波长的数值范围是 $A=0.1\sim 100$ m,对应空间频率为 $n=10^{-2}\sim 10$ m⁻¹,因此两条红线的空间频率数值范围为 $10^{-2}\sim 10$ 。

由图9可以看出,采用方法一和方法二生成的不同车速下路面时域模型的空间功率谱密度并不相同。当车速为1,5,20和40 m·s⁻¹时,采用方法一生成的路面时域模型的空间功率谱密度、下截止空间频率均与实际不符;采用方法二生成的路面时域模型的空间功率谱密度与实际不符,仅是下截止空间频率均保证在了 $n_1=10^{-2}$ m⁻¹,如图10所示。

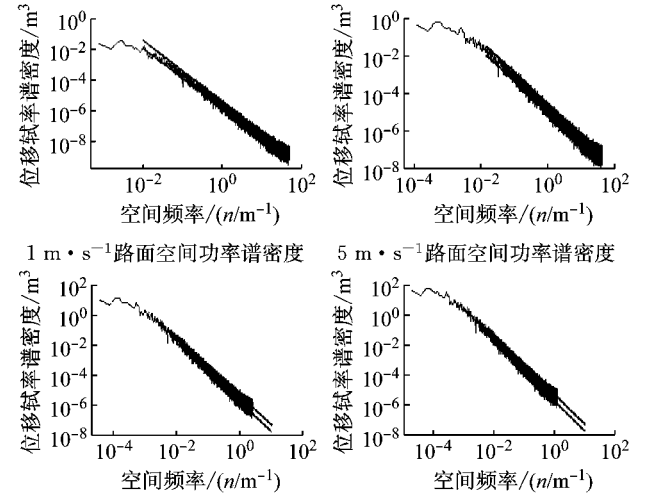


图9 方法一:不同车速下路面时域模型空间功率谱密度

Fig.9 Method1: Space power spectral density of road excitations in different speed conditions

由图11可以看出,采用方法三生成的不同车速下路面时域模型的空间功率谱密度完全相同。且当空间频率 $n \leq 10^{-2}$ (m⁻¹)时,在下截止空间频率 n_0 的作用下,路面位移功率谱密度近似水平直线,与标准规定的路面谱一致。需要说明的是,标准规定的最大空间频率为10 m⁻¹,而图11中各车速下空间功率谱密度的最大空间频率为5 m⁻¹。该现象可用香农采样定理解释——为了不失真地恢复时域信号,采

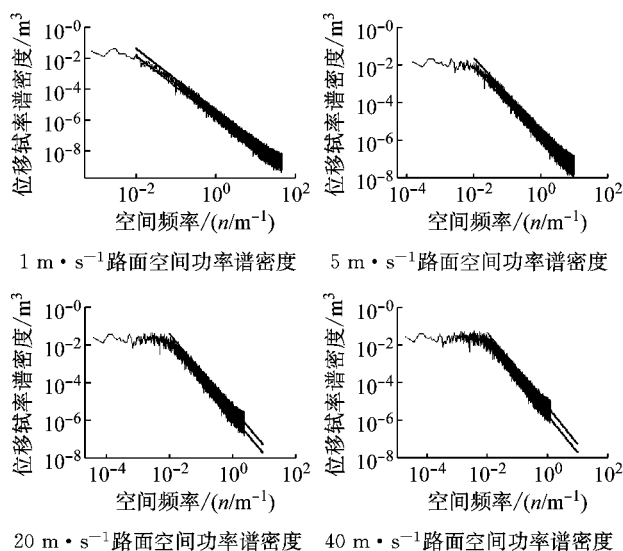


图 10 方法二:不同车速下路面时域模型空间功率谱密度
Fig.10 Method2: Space power spectral density of road excitations in different speed conditions

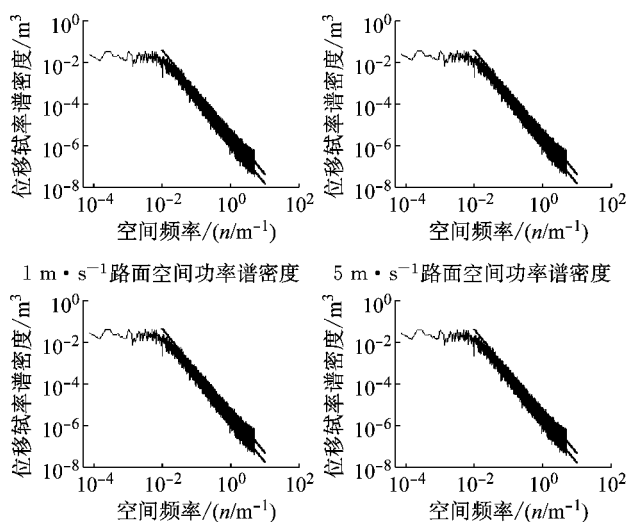


图 11 方法三:不同车速下路面时域模型空间功率谱密度
Fig.11 Method3: Space power spectral density of road excitations in different speed conditions

样频率应该不小于模拟信号频谱中最高频率的 2 倍. 由于生成路面时域模型时, 所采用的最大时间频率对应的最大空间频率为 10 m^{-1} , 在分析信号功率谱密度时, 仅能够分析得到最大时间频率一半(对应空间频率为 5 m^{-1})的时间频率信号, 故图 11 中各车速下空间功率谱密度的最大空间频率为 5 m^{-1} . 若在生成路面时域模型时, 限带白噪声的采样时间设置为 $\frac{1}{20u}$, 则生成最大空间频率为 20 m^{-1} 的路面时域信号. 通过 Welch 方法, 可分析得到最大空间频率为 10 m^{-1} 的空间功率谱密度. 为与标准规定的路面等级相符, 仿真中, 方法三对应的限带白噪声的采样时

间设置为 $\frac{1}{10u}$.

4 1/4 车辆模型仿真研究与分析

为比较三种方法生成的路面时域模型对悬架仿真结果的影响, 以某车型的 1/4 车辆模型为例, 建立了相应动力学方程, 并比较了悬架性能仿真结果.

4.1 1/4 车辆模型

建立图 12 所示 1/4 车辆模型, 模型参数如表 2 所示. 该模型运动方程表达如下:

$$\begin{cases} m_b \ddot{z}_2 = k_s(z_1 - z_2) + c_s(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_s \ddot{z}_1 = k_s(z_2 - z_1) + c_s(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_t(z_1 - z_0) \end{cases} \quad (17)$$

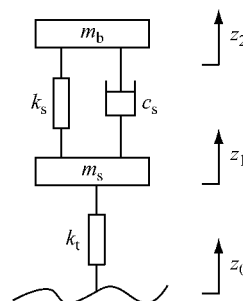


图 12 1/4 车辆模型

Fig.12 1/4 car model

表 2 1/4 车辆模型参数

Tab.2 Parameters of a 1/4 car model	
模型参数	数值
1/4 车身质量 m_b/kg	450
簧下质量 m_s/kg	50
悬架刚度 $k_s/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	28 000
悬架阻尼 $c_s/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	2 000
轮胎刚度 $k_t/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	192 000

由式(17)可分别得到车身加速度、车身-车轮相对位移对路面位移输入的传递函数. 在 Matlab/Simulink 仿真模块分析中, 由生成的路面时域模型作为输入, 可得各个时刻的车身加速度、车身-车轮相对位移和车轮-路面相对位移的瞬时响应.

4.2 仿真结果

车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷是描述悬架性能的三个主要指标. 车身加速度用于评价汽车平顺性, 为了提高乘客的舒适性, 应降低车身的加速度幅值; 悬架动挠度与其限位行程有关, 动挠度过大会导致撞击限位块, 引起悬架非线性现象, 因此减小动挠度有利于提高汽车的平顺性; 轮胎动载荷影响车轮的附着特性, 从而影响汽车操纵稳定性, 在一定范围内降低轮胎的动载荷, 有利于提高汽车操纵稳定性, 从而增加行驶安全性.

仿真分析中,通过各个时刻的车身加速度、车身—车轮相对位移和车轮—路面相对位移的瞬时响应,可分别计算得到车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷的方均根值 σ_{z2} 、 σ_{fd} 和 $\sigma_{Fd/G}$,用以评价悬架性能^[18]。

该 1/4 车辆模型分别以 1, 5, 20 和 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速经过采用方法一、方法二和方法三生成的 C 级路面,得到的悬架性能指标如表 3—表 5 所示。

表 3 方法一:不同车速下悬架性能仿真结果

Tab.3 Method1:simulation results of suspension performance in different speed conditions

车速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1	5	20	40
$\sigma_{z2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.267	0.596	1.192	1.686
σ_{fd}/mm	2.513	5.619	11.25	15.89
$\sigma_{Fd/G}/\text{N}$	173.8	388.6	777.2	1 099

表 4 方法二:不同车速下悬架性能仿真结果

Tab.4 Method2:Simulation results of suspension performance in different speed conditions

车速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1	5	20	40
$\sigma_{z2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.267	0.596	1.185	1.652
σ_{fd}/mm	2.513	5.615	11.1	15.2
$\sigma_{Fd/G}/\text{N}$	173.8	388.6	775.9	1090

表 6 方法一、方法二较方法三悬架性能相对误差

Tab.6 Suspension performance difference in percentage comparison of Method 1 and Method 2 with Method 3

车速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	方法一与方法三悬架性能相对误差/%				方法二与方法三悬架性能相对误差/%			
	1	5	20	40	1	5	20	40
σ_{z2}	45.11	2.76	-0.33	0.00	45.11	2.76	-0.92	-2.02
σ_{fd}	9.12	0.46	0.81	2.12	9.12	0.39	-0.54	-2.31
$\sigma_{Fd/G}$	102.56	8.43	-2.57	-3.85	102.56	8.43	-2.73	-4.64

根据表 6 结果可知,由方法一、方法二生成路面得到的悬架性能数值,并非单纯大于或者小于方法三生成路面得到的悬架性能数值。原因在于,对于方法一而言,仿真分析中虽然改变的是 1/4 车辆模型的车速,但实际上仅改变了方法一生成的时域路面的幅值大小。即不同车速下,路面时域模型对悬架性能的影响是由路面幅值大小变化引起,而路面时域模型的输入频率没有变化。因此,该方法无法体现不同车速时,路面时域模型输入频率变化对车辆振动系统的影响。同时,随着车速的变化,悬架性能仿真结果仅是单纯地与车速成比例变化。对于方法二,仿真分析中改变 1/4 车辆模型的车速时,实际上改变了所生成的路面时域模型的幅值和空间功率谱特性,即不同车速下相同路程内的路面高度历程并不一样,且与标准规定的空间频率不完全相符。采用方法三生成路面时域模型作为系统输入时,改变车速,即改变了与标准一致的路面时域模型的输入频率,且幅值大小没有变化。因此,采用方法三生成的路面时域模型,能够模拟车辆以不同车速经过某特定等

表 5 方法三:不同车速下悬架性能仿真结果

Tab.5 Method3:Simulation results of suspension performance in different speed conditions

车速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1	5	20	40
$\sigma_{z2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.184	0.580	1.196	1.686
σ_{fd}/mm	2.303	5.593	11.16	15.56
$\sigma_{Fd/G}/\text{N}$	85.8	358.4	797.7	1143

由表 3 可知,不同车速下的悬架某性能指标数值大小与车速的关系为 $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{u_1}{u_2}}$ 。

由表 4 仿真结果没法直观得到悬架性能指标数值大小与车速的关系。值得注意的是,方法一和方法二在 1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速下的悬架性能指标数值大小相同,这是因为在此车速下,式(15)中的下截止频率 f_0 和式(16)中的下截止频率 $n_1 u$ 恰好相等。其他车速下悬架性能指标数值大小不一样,是由两种方法的下截止频率不同造成。

采用方法一和方法二生成的时域路面作为输入,与采用方法三生成的时域路面作为输入相比较,悬架性能指标的相对误差如表 6 所示。

采用方法一和方法二生成的时域路面作为输入,与采用方法三生成的时域路面作为输入相比较,悬架性能指标的相对误差如表 6 所示。

级路面的真实情况,结果更加精确。

由表 6 结果可发现,某些车速下,采用不同方法生成的路面时域模型用于悬架性能仿真分析,仿真结果差异不明显,容易疏忽无法发现,更凸显方法三的重要性。

4.3 频域分析

以车身加速度均方根值的计算为例(其他悬架性能指标的计算类同),当车辆分别以 5 和 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速行经 C 级路面时,可根据式(18)和式(19)计算得到。同时,从频域角度分析采用方法三所生成的路面对车身加速度均方根值计算的影响,图解如图 13 所示。

$$\sigma_{z_2} = \int_0^{10u} G_{z_2}(f) df \quad (18)$$

$$G_{z_2}(f) = |H_{z_0}^{z_2}(f)|^2 \cdot G_{z_0}(f) \quad (19)$$

其中, $|H_{z_0}^{z_2}(f)|^2 (\text{s}^{-4})$ 为由车辆振动系统参数确定的幅频特性的模的平方, $G_{z_0}(f) (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $G_{z_2}(f) (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3})$ 分别为时间频率路面功率谱密度和时间频率车身加速度功率谱密度。

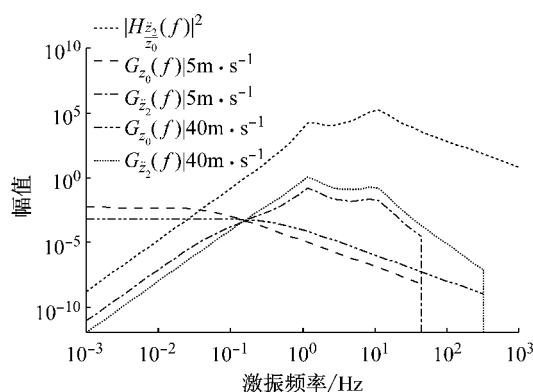


图13 车身加速度均方根值计算过程

Fig. 13 Calculation process of RMS of body acceleration

由图13可以发现,5和40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 车速下,空间频率功率谱密度相同的路面时域模型(前述已证明),其时间频率路面功率谱密度幅值特性和截止频率特性不同.因而,由式(19)算得的时间频率车身加速度功率谱密度也不相同,且 $G_{z_2}(f)|_{v=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)和 $G_{z_2}(f)|_{v=40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)的差异并不在于幅值特性成比例的变化,而是幅值特性和频率范围均有改变,因而由其积分所得车身加速度均方根值体现了不同激励频率段对车辆振动系统的影响.因此,采用方法三体现了路面时域模型输入频率变化对车辆振动系统仿真结果造成的影响,体现了由车身固有频率、簧上簧下质量比、阻尼比、悬架与轮胎的刚度比决定的车辆振动系统模型频率特性的作用.

5 结论

通过理论分析,得到采用滤波白噪声模拟时域路面的方法.进而提出在仿真时,除根据需要改变路面不平度系数和车速外,还需要根据不同车速调整相应的白噪声采样频率($f_s = 10u$),以使不同车速下,路面模型的不同时间频率成分得到体现,并保证了所得路面时域模型空间功率谱密度与标准等级路面对应.然后,对比分析了两种常用滤波白噪声法和本文所提滤波白噪声法模拟路面时域模型的差异.最后,以某1/4车辆模型为例,比较了三种路面时域模型生成方法对振动系统性能的影响.得到以下主要结论:

(1) 采用方法一模拟时域路面,相同仿真时长的路面时域模型频谱频率特性相同,而幅值大小关系为 $\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{u_1}{u_2}}$,且路面时域模型的空间功率谱密度

与标准路面等级的空间功率谱密度不符;采用方法二模拟时域路面,所生成的路面时域模型的空间功率谱密度与标准不符;采用方法三模拟时域路面,相同路程的路面时域模型幅值大小相同,频率关系为 $\frac{f_1}{f_2} = \frac{u_1}{u_2}$,且路面时域模型的空间功率谱密度与标准路面等级的空间功率谱密度相符.

(2) 1/4车辆悬架模型仿真分析中,采用方法一生成的路面作为输入,不同车速下得到的悬架性能指标仅与车速成比例关系,无法体现车辆振动系统频率特性在不同车速引起的不同路面时间频率输入下的响应;采用方法二生成的路面作为输入,不同车速下得到的悬架性能指标不能涵盖标准路面等级规定的路面空间频率造成的影响;采用方法三生成的路面作为输入,不同车速下得到的悬架性能指标能够体现车辆振动系统频率特性在不同车速引起的不同路面时间频率输入下的响应.

此外,分析汽车主动/半主动悬架控制率等汽车非线性振动系统时,常采用路面时域模型.若所模拟的路面时域模型与标准等级路面空间频率特性存在误差,对主动/半主动悬架性能进行时域分析时,导出的悬架控制率可能与实际情况不符.因此,对悬架性能进行时域分析或控制研究时,应采用本文提出的方法三模拟路面时域信号,从而模拟车辆以不同车速行经标准路面的情况.

参考文献:

- [1] 段虎明,石峰,谢飞,等.路面不平度研究综述[J].振动与冲击,2009,28(9):95.
DUAN Huming, SHI Feng, XIE Fei, et al. Research overview of road roughness[J]. Journal of Vibration and Shock. 2009, 28(9): 95.
- [2] Kazem Reza-Kashyzadeh, Mohammad Jafar Ostad-Ahmad-Ghorabi, Alireza Arghavan. Investigating the effect of road roughness on automotive component[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 41:96.
- [3] 金睿臣,宋健.路面不平度的模拟与汽车非线性随机振动的研究[J].清华大学学报:自然科学版,1999,39(8):76.
JIN Ruichen, SONG Jian. Simulation of the road irregularity and study of nonlinear random vibration of the automobile[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1999, 39(8): 76.
- [4] 张永林.车辆道路数值模拟与仿真研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
ZHANG Yonglin. Study on Numerical Modeling and Computer Simulation of Stochastic Road of Vehicle [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010.
- [5] Zhang Y, Zhang J. Numerical simulation of stochastic road

- process using white noise filtration[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2006, 20(2):363.
- [6] Sharma K, Crolla D A, Wilson D A. The design of a fully active suspension system incorporating a Kalman filter for state estimation[C]//Control. Control'94. International Conference on. IET. Coventry:[s.n.], 1994: 344-349.
- [7] Crolla D A, Abdelhady M B A. Active suspension control; performance comparisons using control laws applied to a full vehicle model[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1991, 20(20): 107.
- [8] Yu F, Crolla D A. An optimal self-tuning controller for an active suspension[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1998, 29(1): 51.
- [9] Sharp R S, Wilson D A. On control laws for vehicle suspensions accounting for input correlations [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1990, 19(6): 353.
- [10] Yu F, Zhang J W, Crolla D A. A study of a Kalman filter active vehicle suspension system using correlation of front and rear wheel road inputs [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2000, 214(5): 493.
- [11] 陈杰平, 陈无畏, 祝辉, 等. 基于 Matlab/Simulink 的随机路面建模与不平度仿真[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3):11.
CHEN Jieping, CHEN Wuwei, ZHU Hui, *et al.* Modeling and simulation on stochastic road surface irregularity based on Matlab/Simulink[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 11.
- [12] 贺东宇. 乘用车半主动悬架垂向振动控制问题研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2014.
HE Dongyu. Vertical vibration control problems of semi-active suspension of passenger vehicle [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [13] 陈助碧. 1/4 汽车半主动悬架系统的试验方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
CHEN Zhubi. The test research of 1/4 vehicle semi-active suspension system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [14] 潘双夏, 陈助碧, 冯培恩. M-File S-函数在时域路面不平度建模中的应用[J]. *中国工程机械学报*, 2006(4):379.
PAN Shuangxia, CHEN Zhubi, FENG Pei'en. Investigating M-File S-function on time-domain road roughness modeling [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2006(4): 379.
- [15] 李仕生. 车辆可变阻尼减振器半主动悬架研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
LI Shisheng. Study on vehicle's semi-active suspension based on variable shock absorber [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [16] 薛长久. 越野车电液主动悬架系统控制技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2008.
XUE Changjiu. Research on control strategy of off-road vehicle's hydro-electric active suspension system [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [17] Sayers M W, Gillespie T D, Paterson W D O. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements[M]. Washington D C: The World Bank, 1986.
- [18] Mitschke M, Wallentowitz H. *Dynamik der kraftfahrzeuge* [M]. Berlin: Springer, 1972.
- [19] 赵济海, 王哲人, 关朝秀. 路面不平度的测量分析与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2000.
ZHAO Jihai, WANG Zheren, GUAN Chaoli. Measurement, analysis and application of road roughness[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000.
- [20] Schmid H. How to use the FFT and Matlab's pwelch function for signal and noise simulations and measurements [R]. Muttentz: Institute of Microelectronics of University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, 2012.
- [21] Frigo M, Johnson S G. FFTW: an adaptive software architecture for the FFT[C]//Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference. [S.l.]: IEEE, 1998: 1381-1384.
- [22] Welch P D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra; a method based on time averaging over short, modified periodograms[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1967, 15(2): 70.