



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108180983 A

(43)申请公布日 2018.06.19

(21)申请号 201711468636.9

(22)申请日 2017.12.29

(71)申请人 燕山大学

地址 066004 河北省秦皇岛市海港区河北大街西段438号

(72)发明人 巩明德 张航 陈浩 王豪豪

(74)专利代理机构 秦皇岛一诚知识产权事务所 (普通合伙) 13116

代理人 刘建年

(51) Int. Cl.

G01H 17/00(2006.01)

G01M 17/06(2006.01)

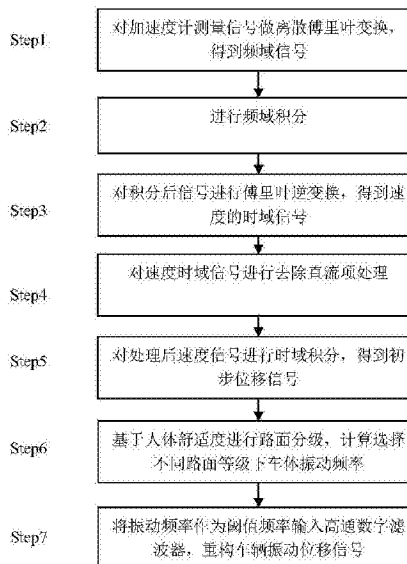
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法

(57)摘要

本发明公开了一种自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法,通过离散傅里叶变换将测量出的时域加速度信号转变为频域信号,在频域内进行第一次积分得到速度信号;再通过傅里叶逆变换为时域速度信号;在时域内进行第二次积分得到初步位移信号。同时基于行车舒适性界限对公路路面进行分级,选择计算不同路面等级下车体振动频率值,作为高通数字滤波器阈值频率,滤波得到车体振动位移。本发明方法采用频域与时域混合积分,可有效消除单独采用时域或频域积分方法产生的累积误差;自适应滤波器阈值频率满足不同等级路面下车体振动位移重构的要求,提高车辆振动位移重构精度和准确性,为应急救援车辆控制车身姿态、保持行驶平顺性和操纵稳定性提供依据。



1. 一种自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法, 其特征在于, 所述方法采用频域与时域混合积分方案, 由加速度传感器采集的信号依次进行一次频域积分和一次时域积分, 经过去除直流项以及自适应滤波处理, 消除单独采用时域或频域积分方法产生的累积误差; 在速度一定的条件下, 应急救援车辆在不同等级路面行驶, 路面等级越高, 车体振动位移越小, 以此为依据, 选择计算出自适应滤波器的阈值频率, 满足不同行驶路面等级下车体振动位移重构的要求;

所述方法的具体步骤如下:

Step1: 将加速度传感器采集到的离散加速度时域信号进行离散傅里叶变换, 得到其频域表达式;

Step2: 根据频域积分方法, 将频率分量的信号值  $A(k)$  进行一次频域积分;

Step3: 对频域积分后得到的信号进行傅里叶逆变换, 得出速度信号的时域表达式;

Step4: 对时域速度信号进行去除直流项处理;

Step5: 对Step4得到的信号进行一次时域数值积分, 得到位移的时域信号;

Step6: 基于行车舒适性界限对路面不平度进行分级, 计算选择不同分级路面下车体振动频率;

Step7: 将振动频率作为阈值频率输入高通数字滤波器, 重构车辆振动位移信号。

2. 根据权利要求1所述的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法, 其特征在于: Step1中, 加速度传感器安装在车辆驾驶室内部的驾驶座位下, 测量驾驶员位置处加速度信息; 对加速度传感器测量得到的加速度信号  $a(t)$  进行离散傅里叶变换, 使其从时域信号转变为频域信号; 离散傅里叶变换的计算公式为

$$\begin{cases} a(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N a(n) e^{\left[ \frac{-2\pi(k-1)(n-1)i}{N} \right]} = a_k + b_k i \\ f(k) = \frac{(n-1)f_0}{2N} \quad 1 \leq k \leq N \end{cases}$$

式中:  $f_0$  为采样频率,  $v(k)$  为傅里叶变换后的频域内复数序列,  $f(k)$  为对应的频率;  $a(k)$  对应简谐波的幅值、圆频率及初相位角可由下式求出, 其表征的简谐波表达式

$$\begin{cases} A(k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ \omega_k = 2\pi f_k \\ \phi_k = \tan^{-1}(b_k / a_k) \end{cases}$$

$$a(t)_k = A_k \cos(\omega_k t + \phi_k)。$$

3. 根据权利要求1所述的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法, 其特征在于: Step2中, 将每一个傅里叶分量的信号值  $A(k)$  转换为一次积分后的值; 由于一次积分值与输入信号值相位相差  $\pi/2$ , 则对应于该频率分量的一次积分值  $D(k)$  为

$$D(k) = d_{1k} + d_{2k} j$$

$$d_{1k} = \frac{A_k}{\omega_k} \cos\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$d_{2k} = \frac{A_k}{\omega_k} \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right)$$

式中： $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ， $\varphi_k = \tan^{-1}(b_k/a_k)$ ， $\omega_k = 2\pi k/T$ 。

4. 根据权利要求1所述的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法，其特征在于：Step3中，根据公式

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{\frac{2\pi}{N} kn}$$

$$n=0, 1, \dots, N-1$$

对Step2输出的信号进行傅里叶逆变换得到时域速度信号。

5. 根据权利要求1所述的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法，其特征在于：Step4中，为消除速度信号中直流项的影响，采用求N个采样点的平均值，再用采样点的值减去平均值的方法；其计算公式如下

$$v_i = v'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v'_i$$

式中： $v_i$ 为去除直流分量后的值， $v'_i$ 为采样时刻的信号值。

6. 根据权利要求1所述的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法，其特征在于：Step5中，将Step4中得到的去除直流项后的速度信号 $v(t)$ 进行时域上的数值积分，积分后得到位移信号；应用Simpson数值积分公式

$$s_i = s_{i-1} + \frac{v_{i+1} + 4v_i + v_{i-1}}{6} \Delta t$$

式中： $v$ 是速度信号， $s$ 是位移信号， $\Delta t$ 是采样时间。

7. 根据权利要求1所述的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法，其特征在于：所述Step6与Step7中，基于行车舒适性界限对路面不平度进行分级；再根据GB7031-1986标准查找对应倍频空间频率，通过空间频率与时间频率转换，计算选择得出滤波器阈值频率。

## 自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及车辆振动位移测量领域,具体涉及一种面向应急救援车辆振动位移重构的信号处理方法。

### 背景技术

[0002] 振动位移的准确获取,是应急救援车辆控制车身位姿、保持行驶平顺性和操纵稳定性的重要依据。应急救援车辆载重量大、行驶工况复杂、外形较大且不规则,加之位移传感器对安装位置、安装空间等测试条件的限定,参见一篇文献名为《车辆限界校核中动态位移的静态测量》,对于车体振动位移的测量具有一定难度。

[0003] 采用加速度传感器测试并进行两次积分得到位移信号的方案相对简便易行,请参见一篇文献名为《用于强震记录仿真地动位移的高精度累积数值积分方法研究》。但是时域积分不可避免会使加速度信号中含带趋势项等干扰因素,同时伴有噪声信号。所以在时域积分中需要进行去趋势项和滤波处理,然而信号的趋势项误差不可能被完全剔除,残余量在二次积分的过程中会被累积放大。参见中国专利名称为《基于数值积分的加速度信号测取位移方法》(申请号为201310637543.X)。加速度积分计算得到的位移会出现漂移失真现象。

[0004] 采用频域积分的方案,借助傅里叶变换,可在频域内直接以正、余弦形式的积分互换关系规避时域内积分对微小误差的累积放大作用。但是频域积分具有对低频敏感的缺点,参见一篇文献名为《基于趋势项误差控制的频域积分算法研究与应用》。频域积分中低频截止频率选择主观性强,且会导致信号截止频率下信息丢失。

### 发明内容

[0005] 本发明目的在于提供一种简单易行、有效可靠、精度高的自适应时频域混合滤波的应急救援车辆振动位移重构方法。

[0006] 为实现上述目的,采用了以下技术方案:本发明所述方法采用频域与时域混合积分方案,由加速度传感器采集的信号依次进行一次频域积分和一次时域积分,经过去除直流项以及自适应滤波处理,消除单独采用时域或频域积分方法产生的累积误差;在速度一定的条件下,应急救援车辆在不同等级路面行驶,路面等级越高,车体振动位移越小,以此为依据,选择计算出自适应滤波器的阈值频率,满足不同行驶路面等级下车辆振动位移重构的要求。

[0007] 所述方法的具体步骤如下:

[0008] Step1:将加速度传感器采集到的离散加速度时域信号进行离散傅里叶变换,得到其频域表达式;

[0009] Step2:根据频域积分方法,将频率分量的信号值 $A(k)$ 进行一次频域积分;

[0010] Step3:对频域积分后得到的信号进行傅里叶逆变换,得出速度信号的时域表达式;

[0011] Step4:对时域速度信号进行去除直流项处理;

[0012] Step5:对Step4得到的信号进行一次时域数值积分,得到位移的时域信号;

[0013] Step6:基于行车舒适性界限对路面不平度进行分级,计算选择不同分级路面下车体振动频率;

[0014] Step7:将振动频率作为阈值频率输入高通数字滤波器,重构车辆振动位移信号。

[0015] 进一步地,Step1中,加速度传感器安装在车辆驾驶室內的驾驶座位下,测量驾驶员位置处加速度信息;对加速度传感器测量得到的加速度信号 $a(t)$ 进行离散傅里叶变换,使其从时域信号转变为频域信号;离散傅里叶变换的计算公式为

$$[0016] \begin{cases} a(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) e^{-j \frac{2\pi(k-1)(n-1)i}{N}} = a_k + b_k i \\ f(k) = \frac{(n-1)f_0}{2N} \quad 1 \leq k \leq N \end{cases}$$

[0017] 式中: $f_0$ 为采样频率, $v(k)$ 为傅里叶变换后的频域內复数序列, $f(k)$ 为对应的频率。

[0018]  $a(k)$ 对应简谐波的幅值、圆频率及初相位角可由下式求出,其表征的简谐波表达式

$$[0019] \begin{cases} A(k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ \omega_k = 2\pi f_k \\ \phi_k = \tan^{-1}(b_k / a_k) \end{cases}$$

[0020]  $a(t)_k = A_k \cos(\omega_k t + \phi_k)$ 。

[0021] 进一步地,Step2中,将每一个傅里叶分量的信号值 $A(k)$ 转换为一次积分后的值;由于一次积分值与输入信号值相位相差 $\pi/2$ ,则对应于该频率分量的一次积分值 $D(k)$ 为

[0022]  $D(k) = d_{1k} + d_{2k} j$

$$[0023] d_{1k} = \frac{A_k}{\omega_k} \cos\left(\phi_k - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$[0024] d_{2k} = \frac{A_k}{\omega_k} \sin\left(\phi_k - \frac{\pi}{2}\right)$$

[0025] 式中: $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ,  $\phi_k = \tan^{-1}(b_k/a_k)$ ,  $\omega_k = 2\pi k/T$ 。

[0026] 进一步地,Step3中,根据

$$[0027] x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn}$$

[0028]  $n=0, 1, \dots, N-1$

[0029] 对Step2得到的信号进行傅里叶逆变换得到时域速度信号。

[0030] 进一步地,Step4中,由于速度信号含有直流项,在积分之前须对速度信号进行处理从而去掉影响因素;求出N个采样点的平均值,再用采样点的值减去平均值;其表达形式为

$$[0031] \quad v_i = v'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v'_i$$

[0032] 式中: $v_i$ 为去除直流分量后的值, $v'_i$ 为采样时刻的信号值。

[0033] 进一步地,Step5中,将Step4中得到的去除直流项信号 $v(t)$ 进行时域上的数值积分,积分后的结果可以得到位移信号;应用Simpson数值积分公式

$$[0034] \quad s_j = s_{j-1} + \frac{v_{j-1} + 4v_j + v_{j+1}}{6} \Delta t$$

[0035] 式中: $v$ 是速度信号, $s$ 是位移信号, $\Delta t$ 是采样时间。

[0036] 进一步地,所述Step6与Step7中,基于行车舒适性界限对路面不平度进行分级;根据GB7031-1986标准查找对应倍频空间频率,通过空间频率与时间频率转换,计算选择得出滤波器阈值频率。

[0037] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0038] 1、采用时频域混合积分的方法,解决了单一积分方法常见的累积误差缺陷,提高车辆振动位移重构精度。

[0039] 2、依据应急救援车辆在不同等级路面的振动频率计算选择自适应滤波阈值频率,方法简单易行、有效可靠,为车辆实时在线调整位姿,保持行驶平顺性和操纵稳定性奠定了基础。

## 附图说明

[0040] 图1为本发明方法的流程图;

[0041] 图2为本方法实施的加速度计安装位置示意图;

[0042] 图3为车体理论振动位移曲线与时域积分振动位移曲线对比示意图;

[0043] 图4为车体理论振动位移曲线与频域积分振动位移曲线对比示意图;

[0044] 图5为车体理论振动位移曲线与时频域混合积分振动位移曲线对比示意图。

## 具体实施方式

[0045] 下面结合附图对本发明做进一步说明:

[0046] 如图1所示为本发明自适应时频域混合滤波的振动位移重构方法流程图。具体包括如下步骤:

[0047] Step1,图2为本方法实施的加速度计安装位置示意图。其中:加速度传感器3安装在驾驶室1内的驾驶座位2下。对加速度传感器测量得到的加速度信号 $a(t)$ 进行离散傅里叶变换,使其从时域信号转变为频域信号。离散傅里叶变换的计算公式为

$$[0048] \quad \begin{cases} a(k) = \frac{2}{N} \sum_1^N a(n) e^{\left[ \frac{-2\pi(k-1)(n-1)i}{N} \right]} = a_k + b_k i \\ f(k) = \frac{(n-1)f_0}{2N} \quad 1 \leq k \leq N \end{cases}$$

[0049] 式中： $f_0$ 为采样频率， $v(k)$ 为傅里叶变换后的频域内复数序列， $f(k)$ 为对应的频率。

[0050]  $a(k)$ 对应简谐波的幅值、圆频率及初相位角可由下式求出，其表征的简谐波表达式

$$[0051] \quad \begin{cases} A(k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ \omega_k = 2\pi f_k \\ \phi_k = \tan^{-1}(b_k / a_k) \end{cases}$$

[0052]  $a(t)_k = A_k \cos(\omega_k t + \phi_k)$

[0053] Step2,将每一个傅里叶分量的信号值 $A(k)$ 转换为一次积分后的值。由于一次积分值与输入信号值相位相差 $\pi/2$ ,则对应于该频率分量的一次积分值 $D(k)$ 为

[0054]  $D(k) = d_{1k} + d_{2k}j$

$$[0055] \quad d_{1k} = \frac{A_k}{\omega_k} \cos\left(\phi_k - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$[0056] \quad d_{2k} = \frac{A_k}{\omega_k} \sin\left(\phi_k - \frac{\pi}{2}\right)$$

[0057] 式中： $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ,  $\phi_k = \tan^{-1}(b_k/a_k)$ ,  $\omega_k = 2\pi k/T$ 。

[0058] Step3,根据如下公式,对Step2得到的信号进行傅里叶逆变换得到时域速度信号。

$$[0059] \quad x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{\frac{2\pi i k n}{N}} \quad n=0,1,\dots,N-1$$

[0060] Step4,为消除速度信号中直流项的影响,采用的去直流方案是:求 $N$ 个采样点的平均值。再用采样点的值减去平均值。其表达形式为

$$[0061] \quad v_i = v'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i$$

[0062] 式中： $v_i$ 为去除直流分量后的值， $v'_i$ 为采样时刻的信号值。

[0063] Step5,将Step4中得到的去除直流项信号 $v(t)$ 进行时域上的数值积分,积分后的结果可以得到位移信号。在这里应用Simpson数值积分公式

[0064] 
$$s_i = s_{i-1} + \frac{v_{i-1} + 4v_i + v_{i+1}}{6} \Delta t$$

[0065] 式中：v是速度信号，s是位移信号，Δt是采样时间。

[0066] Step6，一般的路面不平度是具有零均值、各态历经的平稳Gauss随机过程，因此，车辆在路面激励下的耦合振动，本质上也是一种随机性振动。

[0067] 根据GB7031-1986标准适用于车辆行驶的各种路面和越野路面，路面不平度的统计特性采用垂直位移单边功率谱密度 $G_d(n)$ 描述，如下式

[0068] 
$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega}$$

[0069] 式中：n为空间频率，单位是 $m^{-1}$ ，是波长λ的倒数； $n_0$ 为参考空间频率； $G_d(n_0)$ 是参考空间频率 $n_0$ 下的路面功率谱密度值，称为路面不平度系数，单位是 $[m^3]$ ，取决于公路路面等级；ω为频率指数，决定路面功率谱密度的频率结构。

[0070] 参考标准GB7031-1986，基于功率谱密度，将路面划分为八级。如表1路面不平度分级，规定了各种路面不平度系数范围及其几何平均值。

[0071] 表1路面不平度分级

[0072]

路面等级	路面不平度系数 $G_d(n_0)10^{-6}m^3$ , $n_0=0.1m^{-1}$		
	下限	几何平均	上限
A	8	16	32
B	32	64	128
C	128	256	512
D	512	1024	2048
E	2048	4096	8192
F	8192	16384	32768
G	32768	65536	131072
H	131072	262144	524288

[0073] 基于行车舒适性界限对路面不平度进行分级，由路面不平度与人体响应之间的关系可知：当其它条件不变， $G_d(n_0)$ 增加到S倍的 $G_d(n_0)$ ，即 $SG_d(n_0)$ 时，人体总的加权加速度均方根值也由a增加到 $\sqrt{S}a$ 。根据这一规律，先计算在 $G_d(n) = 1.0 \times 10^{-6}m^3$ 下人体的加速度值，然后以人体全身振动的舒适性界限为基准，反算路面不平度系数。选用车速40km/h进行计算，以应急救援车辆为例，具体计算结果见表2。

[0074] 表2基于人体舒适性路面分级



车速 (km/h)	路面等级	$G_z(n_0) \times 10^{-6} (m^3)$	
		下限	上限
[0075] 40	舒适		141
	较舒适	141	1424
	一般	911	8900
	差	5696	

[0076] 基于上述行车舒适性界限路面分级规则,当应急救援车辆行驶路面等级已知,根据GB7031-1986标准查找对应等级路面不平度系数界限,计算出路面不平度均值,并根据标准附表,名为各倍频中心频率下各种路面的不平度系数范围及其几何平均值,确定对应倍频空间频率。以所述应急救援车辆车速 $v=40\text{km/h}$ 为例,依据空间频率 $n$ 与时间频率 $f$ 各自物理意义进行转换,即 $v=f \cdot n$ 得出阈值频率。得出的所述应急救援车辆在四种路面等级下的对应时间频率如表3:

[0077] 表3应急救援车辆在四种路面等级下对应振动时间频率

[0078]

舒适	较舒适	一般	差
0.33Hz	3.99Hz	6.99Hz	19.15Hz

[0079] Step7,将阈值频率输入高通数字滤波器。高通滤波过程一方面可排除低频部分干扰;另一方面可消除趋势项误差,得出振动位移信号。本专利所涉及滤波器控制算法,是一种适用于应急救援车辆在不同等级路面下可调节档位的自适应控制策略。

[0080] 对于本专利提出的,不同等级路面车辆行驶振动频率作为高通滤波器截止频率的原因作如下说明:

[0081] 1.所述加速度传感器所反映的信号是车体振动位移,低频信号对其影响最大,将不同等级路面下的车辆行驶振动频率设置为滤波器截止频率,能够有效滤除低频信息,保留车体振动位移信号。

[0082] 2.排除共振作用的影响,车体振动不可避免会产生共振现象,将不同等级路面车辆行驶振动频率设置为截止频率可以有效地避免共振现象的放大作用。

[0083] 如图3、图4与图5所示,分别为传统时域积分方法、频域积分方法、本发明所述积分方法与车体理论振动位移曲线对比图。其结果显示,本发明所述方法可提升重构精度,减小误差的累积,为应急救援车辆控制车身位姿,保持行驶平顺性和操纵稳定性提供重要依据。

[0084] 以上所述的实施例仅仅是对本发明的优选实施方式进行了描述,并非对本发明的范围进行限定,在不脱离本发明设计精神的前提下,本领域普通技术人员对本发明的技术方案做出的各种变形和改进,均应落入本发明权利要求书确定的保护范围内。

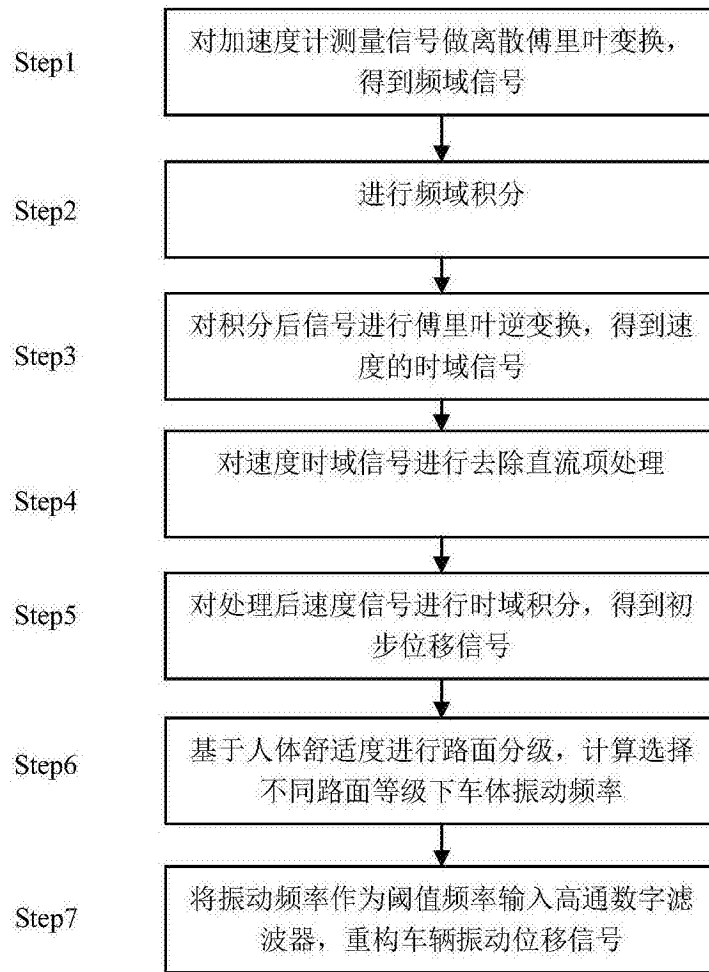


图1

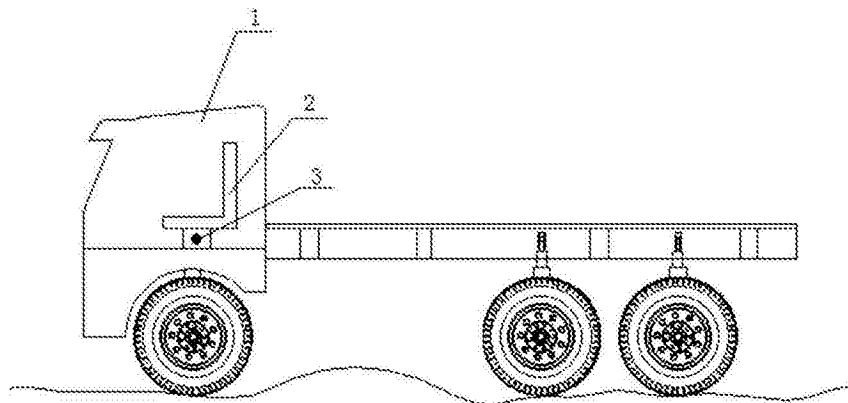


图2

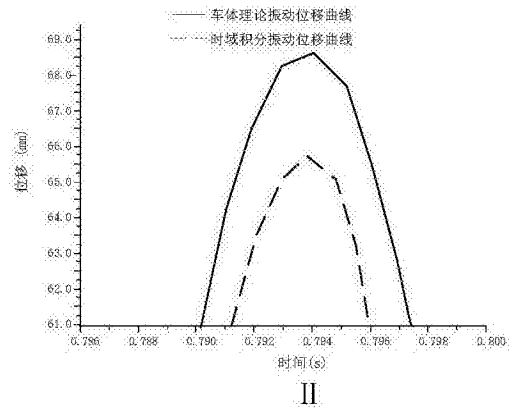
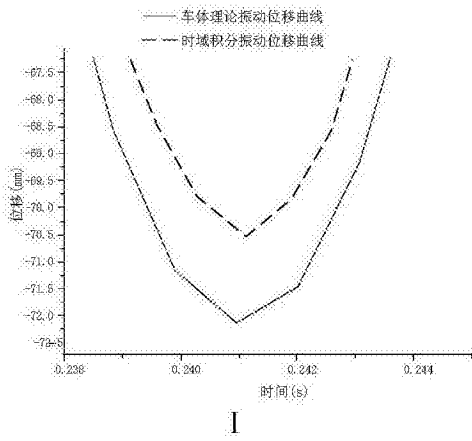
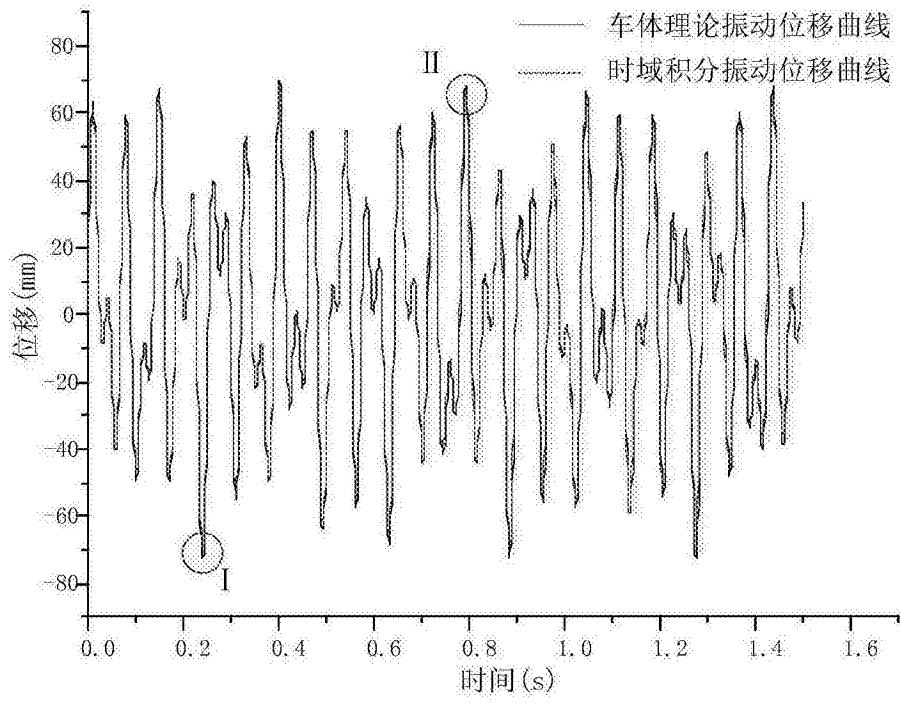


图3

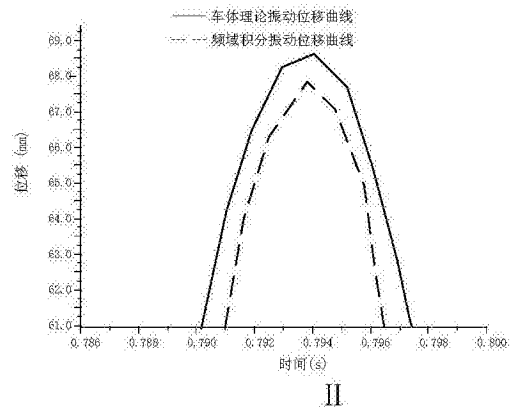
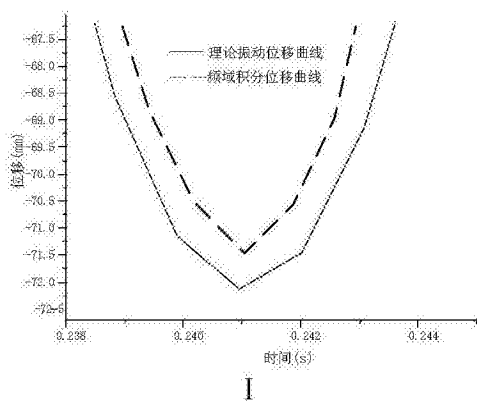
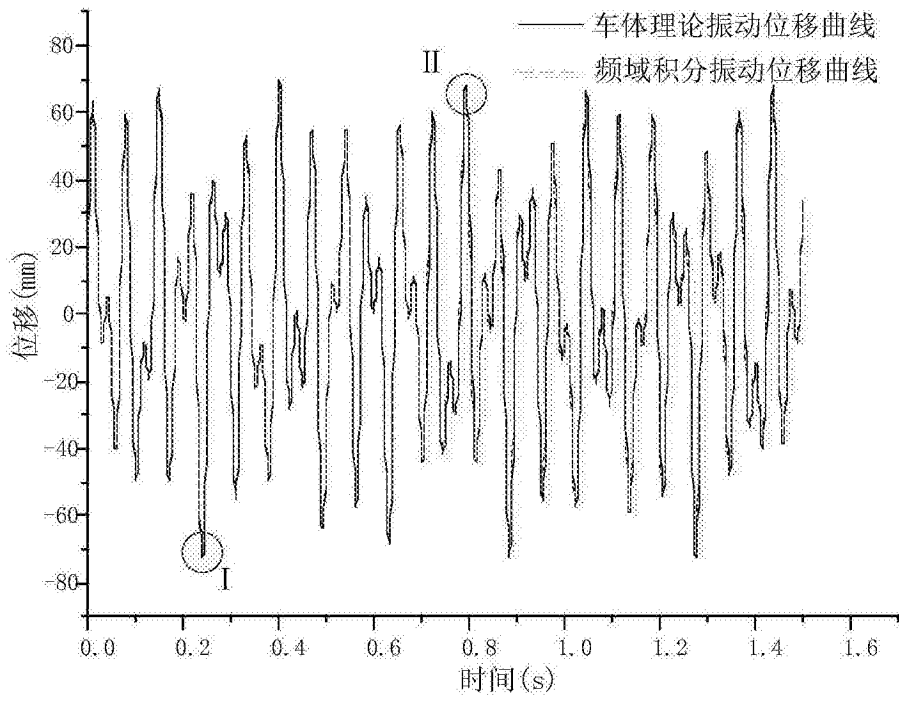
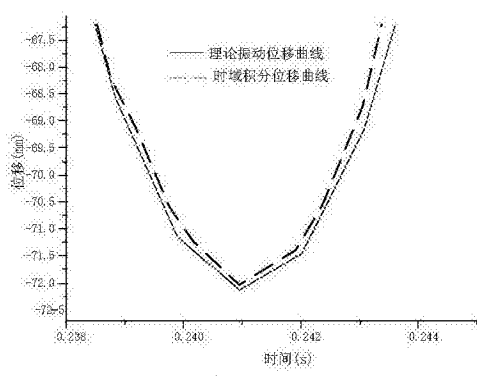
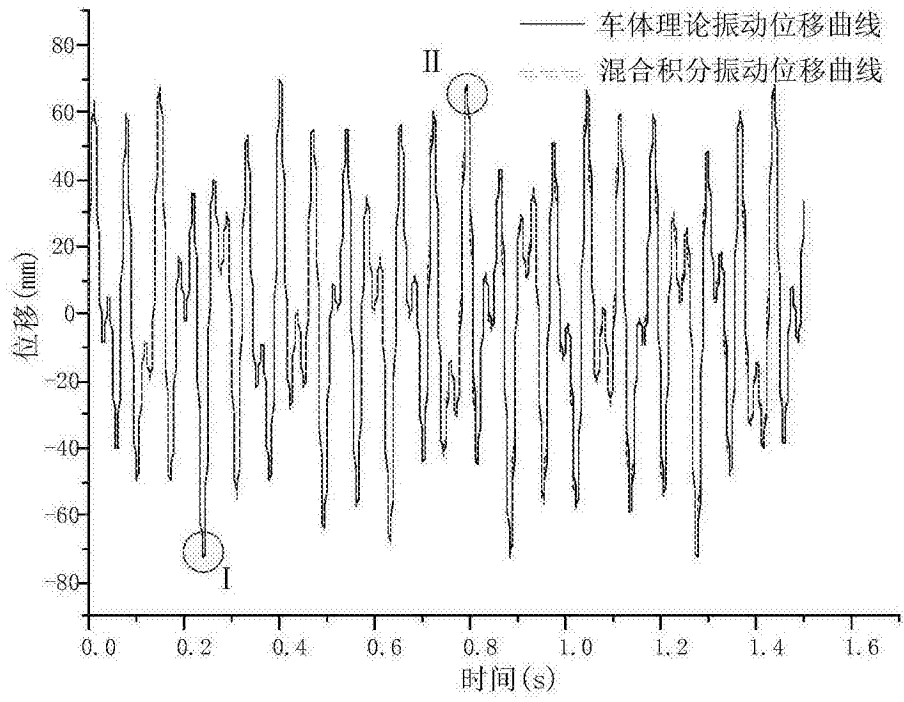
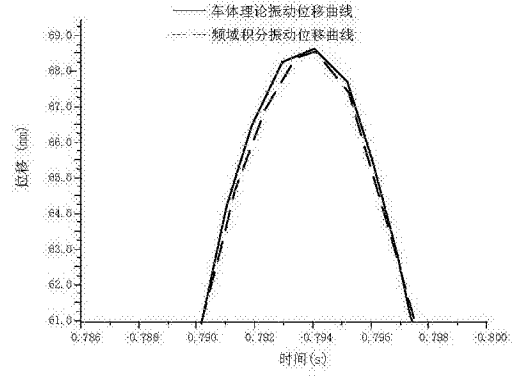


图4



I



II

图5