



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105005694 A

(43) 申请公布日 2015. 10. 28

(21) 申请号 201510409874. 7

(22) 申请日 2015. 07. 13

(71) 申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路 92 号

(72) 发明人 朱劲松 邢雨 王祥宇

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代  
理事务所 12201

代理人 程毓英

(51) Int. Cl.

G06F 19/00(2011. 01)

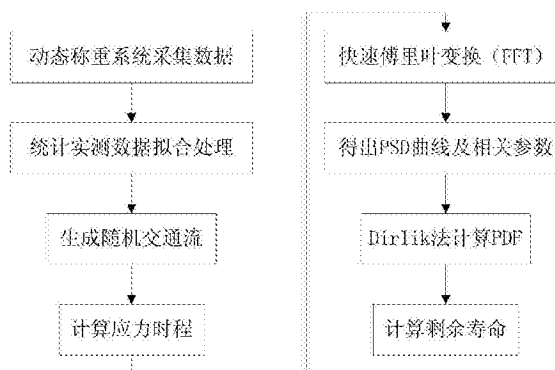
权利要求书2页 说明书6页 附图12页

### (54) 发明名称

一种基于动态称重系统的桥梁疲劳寿命频域  
分析方法

### (57) 摘要

本发明涉及一种基于动态称重系统的桥梁疲劳寿命频域分析方法,包括:采集通过桥梁的各个车辆的车重、车速、轴距数据;统计采集的数据,并进行曲线拟合;拟合的概率密度曲线,建立车辆的元胞自动机仿真模型,生成随机交通流;模拟出不同的车流密度条件下的荷载时程,并将荷载时程加载到桥梁影响线上,得出应力时程数据;对应力时程进行快速傅里叶转换 FFT,并得到应力功率谱密度 PSD,并计算出相关参数;使用 Dirlik 法建立应力概率密度函数 PDF 的经验形式;计算剩余寿命。本发明使得计算时间大大减少。



1. 一种基于动态称重系统的桥梁疲劳寿命频域分析方法,包括下列步骤:

第一步:采集通过桥梁的各个车辆的车重、车速、轴距数据;

第二步:统计第一步采集的数据,并进行曲线拟合,具体步骤如下:

1) 根据桥梁测试分类标准对统计数据进行分类,并绘制出各类车辆的车重、车长及车速统计直方图;

2) 通过对车重、车长及车速的直方图进行分析,确定曲线拟合方法:

对于单峰分布,采用两参数威布尔分布进行拟合;对于双峰分布,采用双峰正态分布进行拟合;对于多峰分布,采用根据数据插值绘制概率密度曲线;

第三步,将元胞的长度设计为 0.1 米,根据第二步拟合的概率密度曲线,建立车辆的元胞自动机仿真模型,生成随机交通流;

第四步,根据第三步生成的随机交通流,模拟出不同的车流密度条件下的荷载时程,并将荷载时程加载到桥梁影响线上,得出应力时程数据;

第五步,对应力时程进行快速傅里叶转换 FFT,并得到应力功率谱密度 PSD,并计算出相关参数,具体步骤如下:

1) 使用 MATLAB 自带的 pwelch 函数对应力时程进行快速傅里叶转换 FFT,将时域信号转化为频域信号,并得出应力功率谱密度 PSD,离散取样时,采用 hanning 窗函数,以解决频谱泄漏问题;

2) 使用公式  $m_n = \int_0^\infty f^n \cdot G(f) df$  对应力功率谱密度 PSD 处理,式中,  $m_n$  为应力功率谱密度 PSD 的  $n$  次矩,  $f$  为频率,  $G(f)$  为  $f$  频率下对应的功率;

3) 对应力功率谱密度 PSD 的  $n$  次矩进行特征化处理,得到  $E[0] = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$ ,  $E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$ ,  $\gamma = \frac{E[0]}{E[P]} = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$ ,  $RMS = \sqrt{m_0}$ , 式中,  $E[0]$  为应力时程曲线与时间轴交点的数目,  $E[P]$  为应力时程曲线的峰值点数目,  $\gamma$  为不规则系数,  $0 < \gamma < 2$ ;  $RMS$  为信号统计值的均方根;

第六步,使用 Dirlik 法建立应力概率密度函数 PDF 的经验形式,公式为

$$p(S) = \frac{D_1 e^{\frac{Z}{Q} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}}}}}{2(m_0)^{1/2}}, \text{ 式中 } X_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, X_m \text{ 为平均频率; } Z = \frac{S}{2(m_0)^{1/2}}, Z \text{ 为标准应力范围, } S \text{ 为应力幅;}$$

式中  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $Q$ 、 $D_3$ 、 $R$  为经验权重因子,取值范围由平均频率  $X_m$  和不规则系数  $\gamma$  确定,

$$D_1 = \frac{2(X_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}, D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 + \gamma^2}, Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}, D_3 = 1 - D_1 - D_2, R = \frac{\gamma - X_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2};$$

第七步,计算剩余寿命。

2. 根据权利要求 1 所述的桥梁疲劳寿命频域分析方法,其特征在于,第七步具体步骤如下:

1) 使用振动疲劳方法计算损伤度,公式为  $E[D] = E[P] \frac{T}{K} \int_0^\infty S^m p(S) dS$ , 式中,

$T$  为 1s,  $p(S)$  为概率密度,  $K$ 、 $m$  为疲劳细节的 S-N 曲线参数,其中  $K$  为材料常数,  $1/m$  为 S-N 曲线负斜率;

2) 根据损伤度,计算剩余寿命。

## 一种基于动态称重系统的桥梁疲劳寿命频域分析方法

### 所属技术领域

[0001] 本发明属于桥梁疲劳寿命评估技术领域。

### 背景技术

[0002] 改革开放以来我国的国民经济迅猛发展,越来越多的机动车辆出现在城市桥梁和道路上,其中不乏一些重车和超重车,对现有桥梁的设计寿命和使用安全形成了巨大的挑战。随着桥梁的疲劳损伤越来越频繁的发生,甚至出现了因疲劳而发生整体坍塌的桥梁破坏,引起了我国交通管理部门的极高重视。

[0003] 对桥梁进行疲劳剩余寿命评估需要通过实测法或者规范方法来获得应力历程。实测法获得应力时程相对来说比较直接并且更接近实际,该方法是通过在实桥特定测点安置应变传感器,获取测点某段时间的应力历程。但实测法操作不便,成本较高,并且通过测点部位的疲劳状况估计其他部位的疲劳会给评估带来不便及偏差。规范法获得应力时程比较方便,该方法是将规范规定的标准疲劳车加载在结构影响线上模拟计算出应力历程。目前各国都在各自的桥梁设计规范中给出了相应的疲劳设计车辆荷载谱,但我国在这方面开展的研究很少,且由于机动车辆的数量迅速增加、重车及超重车的不断出现,现行规范荷载与实际车辆荷载不相适应。

[0004] 目前桥梁疲劳评估一般基于线性累积损伤理论,多采用雨流计数法得到应力谱,然后结合材料的疲劳特性(S-N曲线)求得循环荷载对结构造成的损伤,进而预测寿命。但这种方法需要存储大量数据,且需要循环计数,计算量非常大,计算时间非常长,难以实现实时桥梁疲劳寿命预测。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是克服现有技术的不足,解决现有桥梁评估方法精度不高、储存数据过多、计算时间过长等缺点,结合动态称重系统(WIM)提供一种桥梁疲劳频域分析方法。本发明的技术方案如下:

[0006] 为实现上述发明目的采用了以下技术方案:

[0007] 一种基于动态称重系统的桥梁疲劳寿命频域分析方法,包括下列步骤:

[0008] 第一步:采集通过桥梁的各个车辆的车重、车速、轴距数据;

[0009] 第二步:统计第一步采集的数据,并进行曲线拟合,具体步骤如下:

[0010] 1) 根据桥梁测试分类标准对统计数据进行分类,并绘制出各类车辆的车重、车长及车速统计直方图;

[0011] 2) 通过对车重、车长及车速的直方图进行分析,确定曲线拟合方法:

[0012] 对于单峰分布,采用两参数威布尔分布进行拟合;对于双峰分布,采用双峰正态分布进行拟合;对于多峰分布,采用根据数据插值绘制概率密度曲线;

[0013] 第三步,将元胞的长度设计为0.1米,根据第二步拟合的概率密度曲线,建立车辆的元胞自动机仿真模型,生成随机交通流;

[0014] 第四步,根据第三步生成的随机交通流,模拟出不同的车流密度条件下的荷载时程,并将荷载时程加载到桥梁影响线上,得出应力时程数据;

[0015] 第五步,对应力时程进行快速傅里叶转换 FFT,并得到应力功率谱密度 PSD,并计算出相关参数,具体步骤如下:

[0016] 1) 使用 MATLAB 自带的 pwelch 函数对应力时程进行快速傅里叶转换 FFT,将时域信号转化为频域信号,并得出应力功率谱密度 PSD,离散取样时,采用 hanning 窗函数,以解决频谱泄漏问题;

[0017] 2) 使用公式  $m_n = \int_0^\infty f^n \cdot G(f) df$  对应力功率谱密度 PSD 处理,式中,  $m_n$  为应力功率谱密度 PSD 的  $n$  次矩,  $f$  为频率,  $G(f)$  为  $f$  频率下对应的功率;

[0018] 3) 对应力功率谱密度 PSD 的  $n$  次矩进行特征化处理,得到

$E[0] = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}, \gamma = \frac{E[0]}{E[P]} = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}}, RMS = \sqrt{m_0}$ , 式中,  $E[0]$  为应力时程曲线与时间轴交点的数目,  $E[P]$  为应力时程曲线的峰值点数目,  $\gamma$  为不规则系数,  $0 < \gamma < 2$ ; RMS 为信号统计值的均方根;

[0019] 第六步,使用 Dirlik 法建立应力概率密度函数 PDF 的经验形式,公式为

$p(S) = \frac{D_1 e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}}}{2(m_0)^{1/2}}$ , 式中  $X_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$ ,  $X_m$  为平均频率;  $Z = \frac{S}{2(m_0)^{1/2}}$ ,  $Z$  为标准应力范围,  $S$  为应力幅;

[0020] 式中  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $Q$ 、 $D_3$ 、 $R$  为经验权重因子,取值范围由平均频率  $X_m$  和不规则系数  $\gamma$  确定,  $D_1 = \frac{2(X_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}$ ,  $D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 + \gamma^2}$ ,  $Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}$ ,  $D_3 = 1 - D_1 - D_2$ ,  $R = \frac{\gamma - X_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}$ ;

[0021] 第七步,计算剩余寿命。

[0022] 计算剩余寿命的具体步骤如下:

[0023] 1) 使用振动疲劳方法计算损伤度,公式为  $E[D] = E[P] \frac{T}{K} \int_0^\infty S^m p(S) dS$ , 式中,  $T$  为  $1s$ ,  $p(S)$  为概率密度,  $K$ 、 $m$  为疲劳细节的 S-N 曲线参数,其中  $K$  为材料常数,  $1/m$  为 S-N 曲线负斜率;

[0024] 2) 根据损伤度,计算剩余寿命。

[0025] 本发明的有益效果如下:

[0026] 1) 本发明使用动态称重系统采集的车长、车重、车速等数据,通过分析拟合出对应曲线,并使用元胞自动机产生交通流,进而计算应力时程。本发明采用的应力时程相对传统规范法而言更为符合实际情况,解决了由于机动车辆的数量迅速增加、重车及超重车的不断出现,现行规范荷载与实际车辆荷载不相适应的问题;同时相对实测应力法而言,避免了通过测量有限点的数据来推算实际结构的整体疲劳性能时测点选择时带来的偏差。

[0027] 2) 在桥梁的日常运行中,车辆对桥的作用实际上是一种随机振动。对应力时程进行快速傅里叶变换 (FFT),将时域信号转化为频域信号,可以分析其频谱特性,进而采用振动疲劳分析的方法对桥梁进行疲劳评估,运算结果更为精确。

[0028] 3) 使用 Dirlik 方法得出应力幅的概率密度函数 (PDF),计算简单,避免了雨流计数法的循环计数、数据处理量大、计算时间长等特点,更适用于桥梁健康监测系统实时分

析。

[0029] 4) 随机动态应力在时域内需要很长的信号记录才能准确地描述随机响应,用来进行疲劳分析的频域信号采样率只要达到时域信号采样率的 1/10 就可以得到与用时域信号预测同样精度的结果,频域信号的读取、储存都比时域信号方便。

## 附图说明

[0030] 图 1 本发明原理流程图

[0031] 图 2 本发明采用的动态称重系统采集的 B 类车车速直方图

[0032] 图 3 本发明采用的动态称重系统采集的 B 类车车长直方图

[0033] 图 4 本发明采用的动态称重系统采集的 B 类车车重直方图

[0034] 图 5 本发明采用的动态称重系统采集的 B 类车车速概率密度模拟

[0035] 图 6 本发明采用的动态称重系统采集的 B 类车车长概率密度模拟

[0036] 图 7 本发明采用的动态称重系统采集的 B 类车车重概率密度模拟

[0037] 图 8 本发明计算出的 B 类车车重计算函数

[0038] 图 9 本发明采用的动态称重系统采集的 F 类车车重直方图

[0039] 图 10 本发明采用的动态称重系统采集的 F 类车车重概率密度模拟

[0040] 图 11 MATLAB 语言编程序模拟出不同的车流密度条件下的荷载-时间历程

[0041] 图 12 采用频谱分析得到的应力功率谱密度 PSD

[0042] 图 13 Dirlik 法计算得到的应力幅概率密度函数 PDF

## 具体实施方式

[0043] 动态称重系统 (WIM, Weight In Motion) 是一组安装的传感器和含有软件的电子仪器,用来测量动态轮胎力和车辆通过时间,以提供车重、车速、轴距等数据。依据天津某桥动态称重系统采集的数据,结合公式和附图对本发明具体实施方式进行详细说明。

[0044] 图 1 是本发明的流程图。

[0045] 根据该桥测试分类标准将车辆分为 BCDF 四类,对实测数据按照车型分为四组,并对每组进行统计,绘制出各类车车速、车重、车长的直方图,如图 2、图 3、图 4、图 9 所示。通过对直方图进行分析,确定曲线拟合方法:

[0046] 对于单峰分布,一般采用两参数威布尔分布进行拟合,概率密度函数为:

$$[0047] \quad f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}\right]$$

[0048] 其中  $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ ,均为威布尔分布的尺度参数和形状参数。利用 MATLAB 根据最大似然估计法对其进行两参数威布尔分布的拟合。

[0049] 对于双峰分布,可以采用双峰正态分布进行拟合。

[0050] 而对于多峰分布的拟合,一般可以也采用双峰正态分布进行拟合。但是考虑到基于双峰正态分布的最大似然法在计算上的困难,不再尝试构造表达式去拟合概率分布,而是直接根据数据插值绘制概率密度曲线。具体步骤如下:

[0051] 1) 根据数据绘制出频段为 50 的直方频数图;

[0052] 2) 将频数图转化为频率图,取每段中点和该段频率除以该段长度为两组对应的数

据；

[0053] 3) 以这两组数据为基础,用三次 Hermite 插值进行插值并绘制出概率密度函数。

[0054] 通过 MATLAB 中的 mle 函数对数据进行威尔布拟合,拟合参数结果如下：

[0055]

车型	车速		车长		车重	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
B	45.534	2.828	618.55	4.366	5160.2	1.3195
C	53.819	3.487	993.49	3.9695	-	-
D	51.903	2.622	548.24	5.9539	1750.6	1.2278
F	47.902	2.86	1603.4	5.4906	-	-

[0056] 拟合曲线如图 5、图 6、图 7、图 10 所示。

[0057] 在交通流的模拟中,元胞自动机是一个被广泛使用的方法,但是在交通流的模拟中,往往会出现加速度过大,速度取值单一等缺点。这些缺点可能对于桥梁构件的应力会有影响,所以本文针对疲劳寿命评估而生成随机交通流,将桥离散为 0.1 米为一个单元进行疲劳寿命的评估。为了便于交通流的模拟和应力时程的计算,进行以下的简化：

[0058] 1. 认为桥上车辆总是愿意以某一恒定速度前进,当前面有车辆阻碍前进时会优先选择换车道超车,如果不能换车道则选择减速前进；

[0059] 2. 由于 WIM 实测数据没有给出桥上车距的数据,这里把桥上的车辆的最小间距都取某一特定值；

[0060] 3. 桥上车辆对桥的荷载可以看成是通过车辆的中点传递给桥的；

[0061] 4. 根据英国桥规 BS5400,在考虑桥梁疲劳损伤时,车重小于 30kN 的车辆按 30kN 计算；

[0062] 5. 考虑到桥梁的应力时程和车流密度、桥的结构构造、组成材料和跨长,仅考虑不同车流密度的情况下桥梁的应力时程的变化。

[0063] 根据以上规则,以 WIM 实测数据为基础,设置不同的车流量密度,用 MATLAB 语言编制程序模拟出不同的车流密度条件下荷载-时间历程,如图 11 所示。将荷载-时间历程加载到桥梁影响线上,得出应力时程数据。

[0064] 功率谱密度 PSD 用来代表频率中的信号变化,它显示了在不同频率下振动的强弱。PSD 由 FFT 信号和它的共轭转换信号得来,单位是  $G^2/Hz$  代表了 FFT 的平方值。

[0065] 使用 MATLAB 自带的 pwelch 函数对应力时程进行快速傅里叶转换 (FFT),将时域信号转化为频域信号,同时得出功率谱密度 PSD 如图 12 所示。离散取样时,采用 hanning 窗函数,以解决频谱泄漏问题。

[0066] 在计算应力幅概率密度函数 (PDF)、使用振动分析方法计算剩余寿命之前,需要先对谱密度函数进行特征化处理,以获得一些必要的统计参数。

[0067] 
$$m_n = \int_0^\infty f^n \cdot G(f) df$$

[0068] 
$$E[0] = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

$$[0069] \quad E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$$

$$[0070] \quad \gamma = \frac{E[0]}{E[P]} = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$$

$$[0071] \quad RMS = \sqrt{m_0}$$

[0072] 使用频域方法计算桥梁剩余寿命, 应力范围直方图的数据应该用概率密度函数的形式表达。使用 Dirlik 法建立应力 PDF 的经验形式, 该方法基于蒙特卡洛法重复的随机采样来取样结果, 适用于宽带和窄带信号, 计算公式如下:

$$[0073] \quad p(S) = \frac{D_1 e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_{22} Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}}}{2(m_0)^{1/2}}$$

[0074] 其中

$$[0075] \quad X_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}},$$

$$[0076] \quad Z = \frac{S}{2(m_0)^{1/2}},$$

$$[0077] \quad D_1 = \frac{2(X_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2},$$

$$[0078] \quad D_2 = \frac{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}{1 + \gamma^2},$$

$$[0079] \quad Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - D_2 R)}{D_1}$$

$$[0080] \quad D_3 = 1 - D_1 - D_2,$$

$$[0081] \quad R = \frac{\gamma - X_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}$$

[0082] Dirlik 方法建立在频域信号的基础上, 由于  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_4$  都已经由 PSD 函数计算出来, 通过这种方法获得应力幅的概率密度函数要比雨流法循环计数以获得应力谱要快的多。

[0083] 频域法计算疲劳损伤采用以下公式:

$$[0084] \quad E[D] = E[P] \frac{T}{K} \int_0^\infty S^m p(S) dS$$

[0085] 其中  $S$  代表应力幅,  $p(s)$  为概率,  $T$  为 1 秒, 通过叠加每秒的损伤即可计算出桥梁的疲劳寿命。常数  $k$  和  $m$  是由细节种类的 S-N 曲线决定的。失效次数  $N$  与常幅循环荷载下的  $S$  存在线性关系, 为了计算变化振幅下的应力所造成的疲劳损伤, 引进了概率密度函数 (PDF) 的概念。

[0086] 最终通过基于动态称重系统的桥梁疲劳频域分析方法, 与传统时域方法相比结果如下表:

[0087]



	频域法	时域法
采样点（个）	864000	36000
计算时间（秒）	87.47	709.73
剩余寿命（年）	599.76	636.57

[0088] 由以上分析可知频域法与时域法进行疲劳分析相比,计算时间大大减少,而结果(剩余寿命)相似,进一步验证了基于动态称重系统的频域分析法的正确性和实用性。

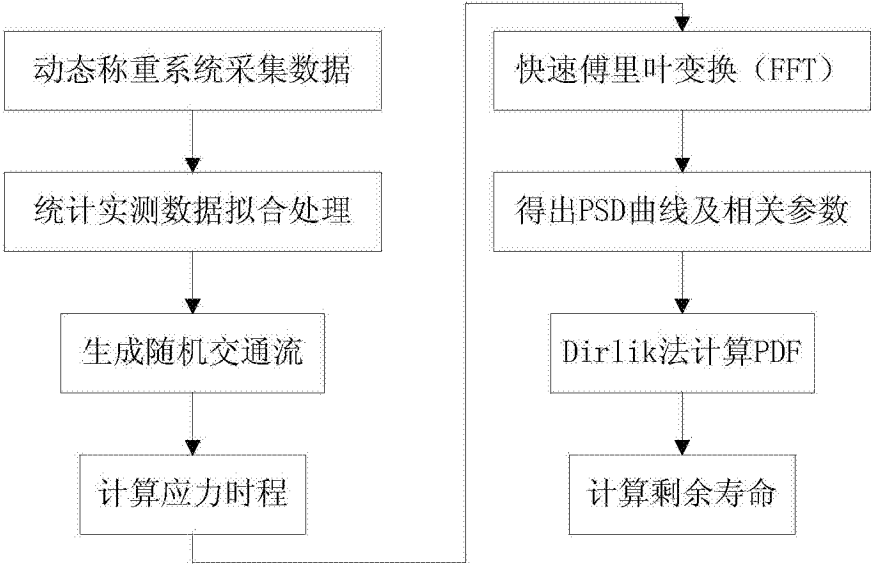


图 1

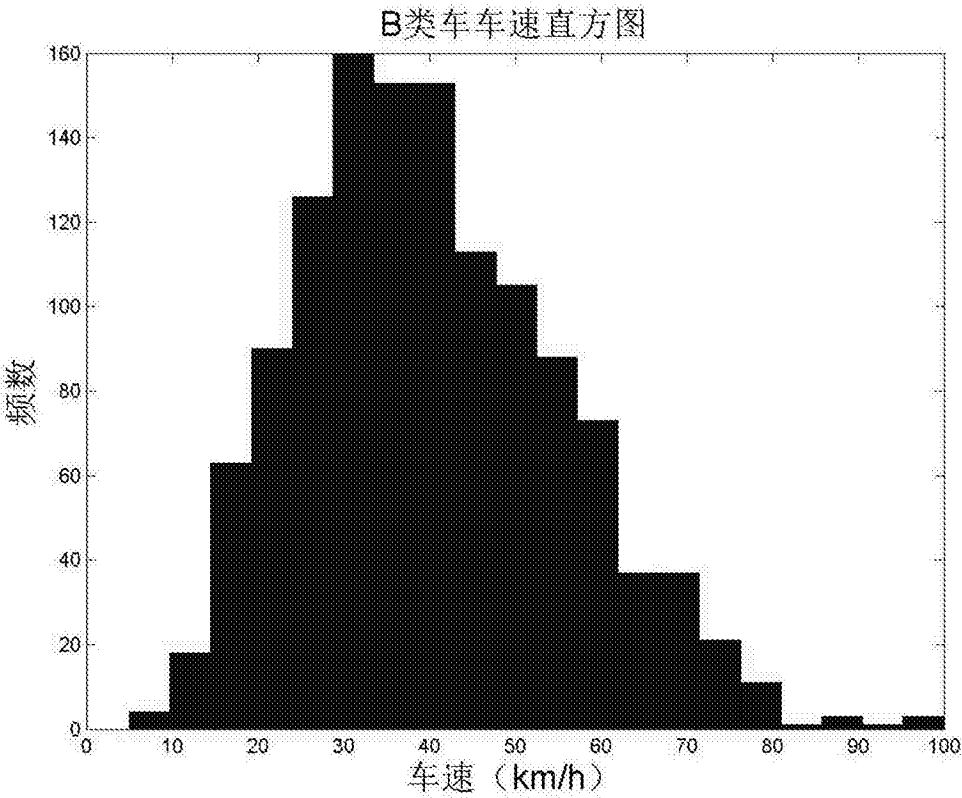


图 2

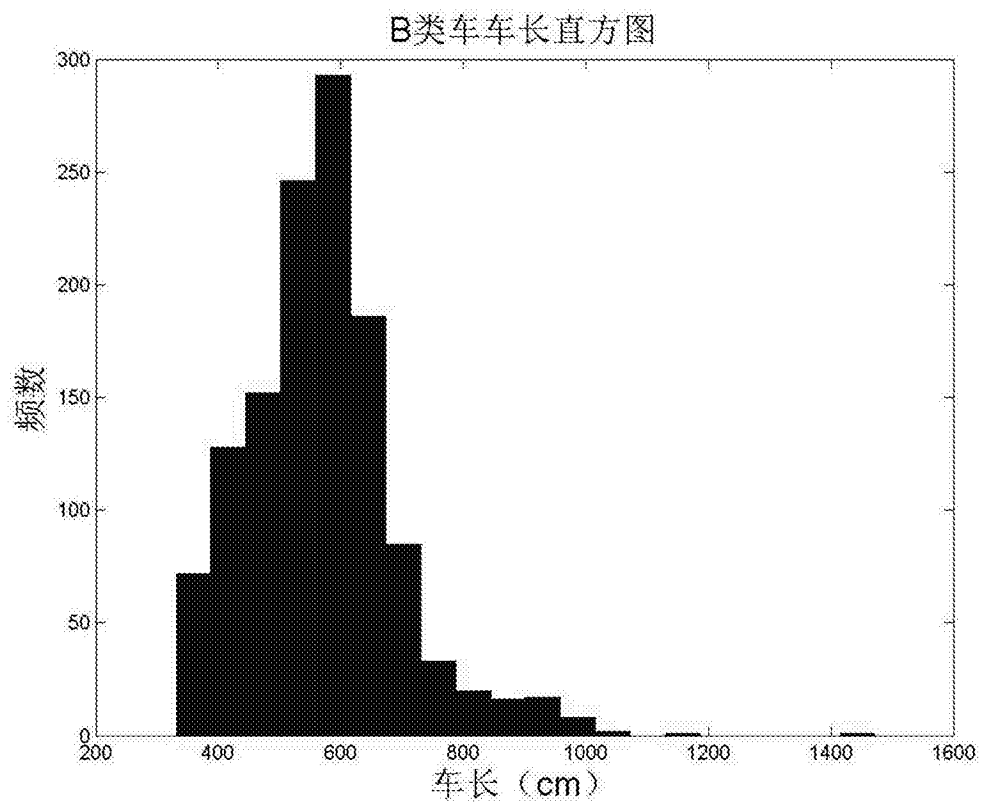


图 3

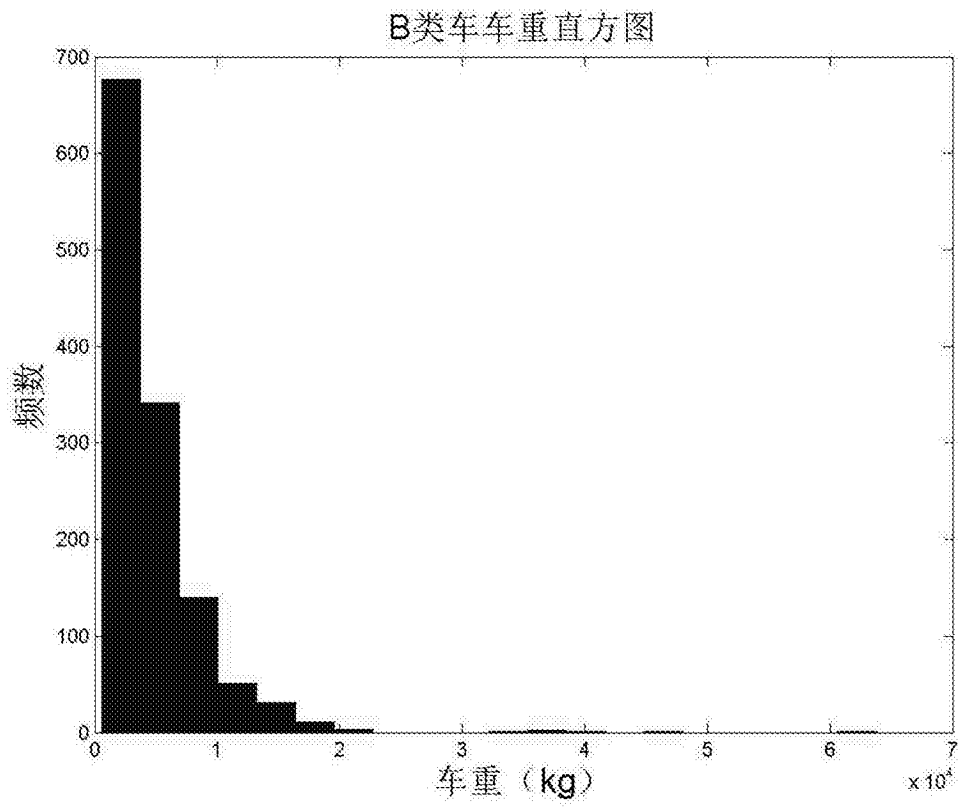


图 4

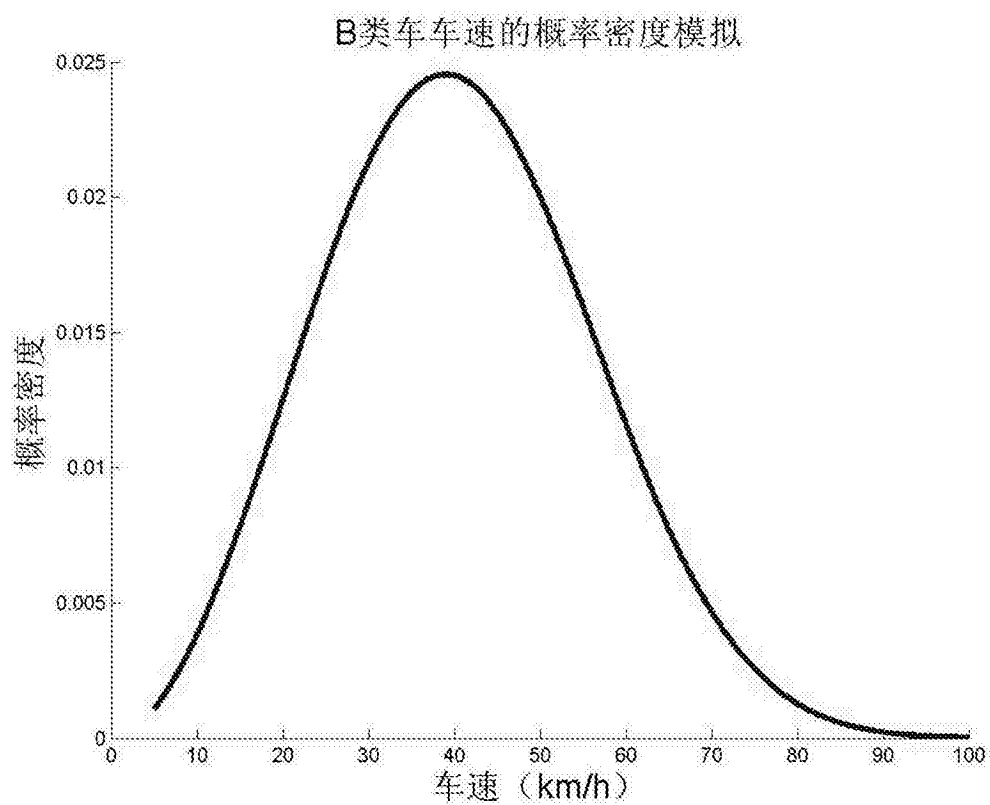


图 5

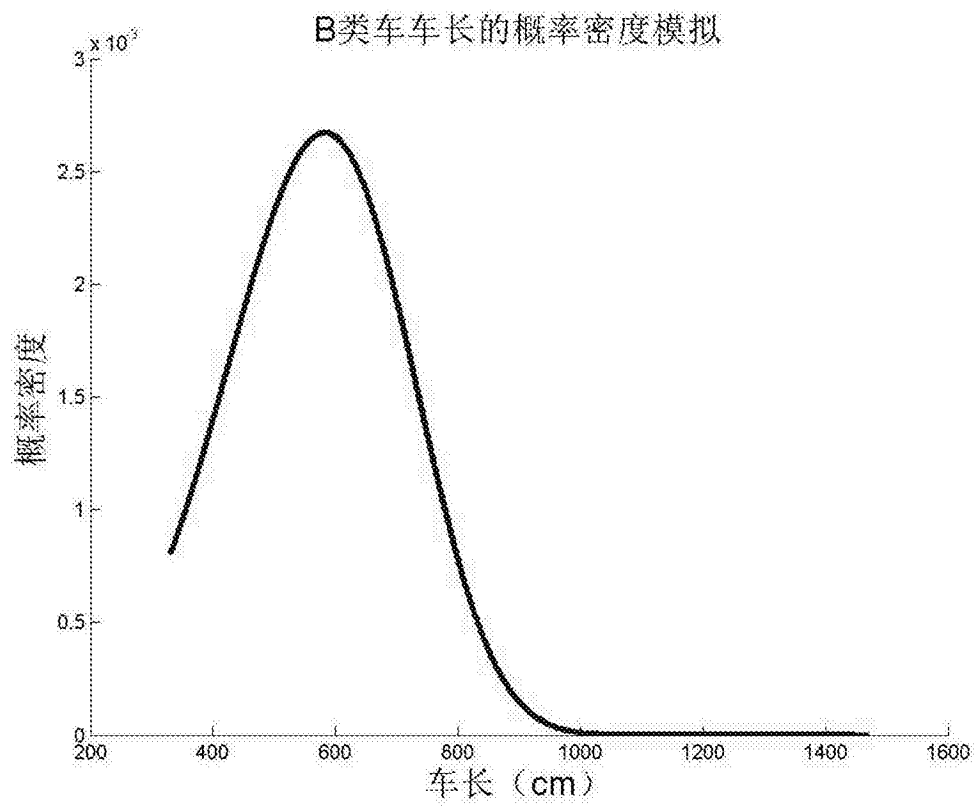


图 6

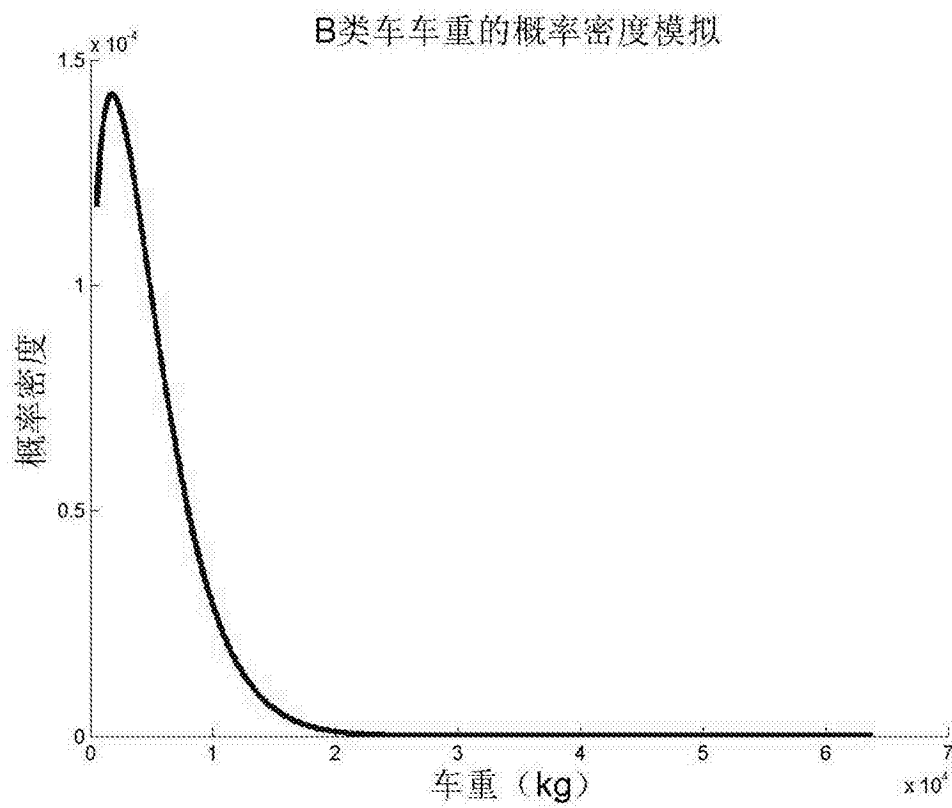


图 7

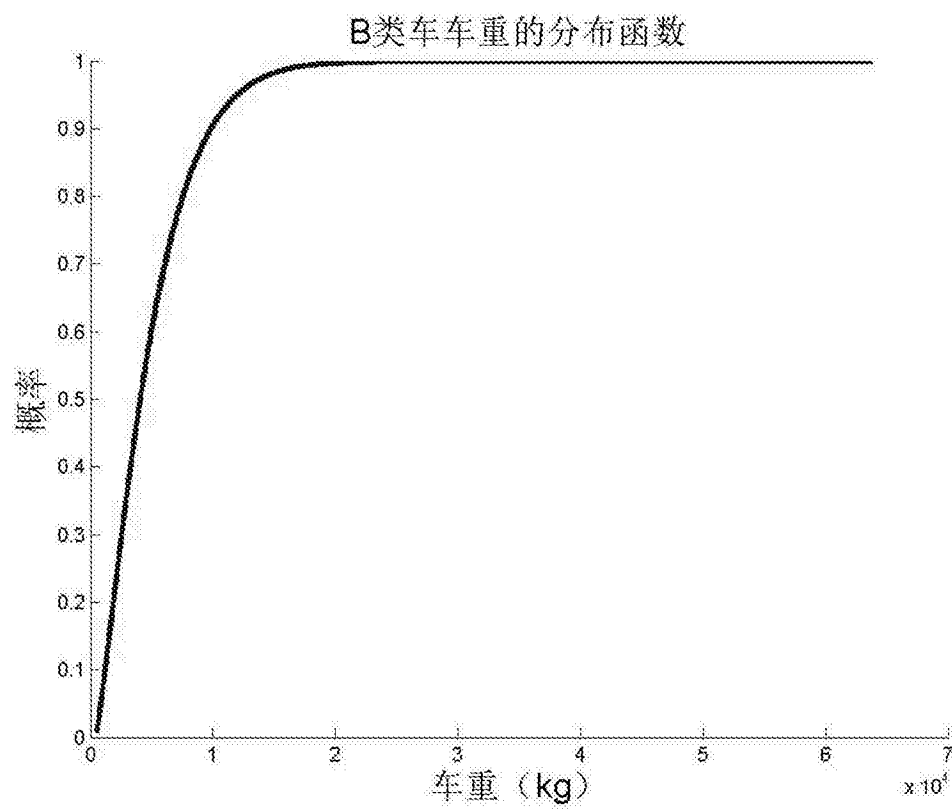


图 8



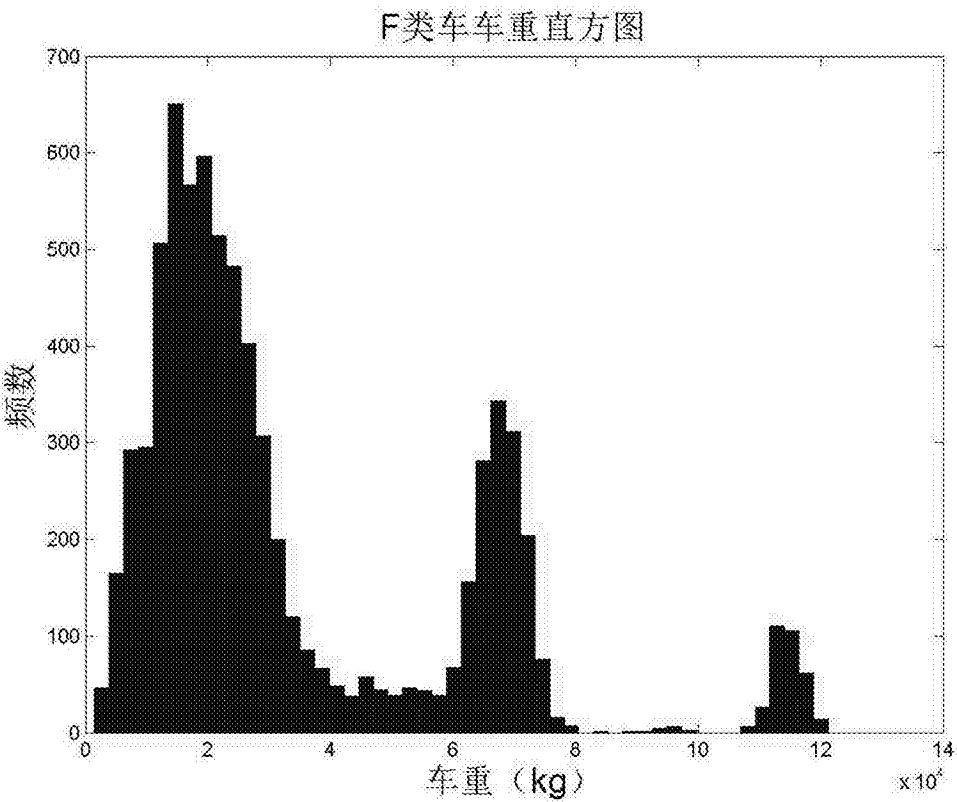


图 9

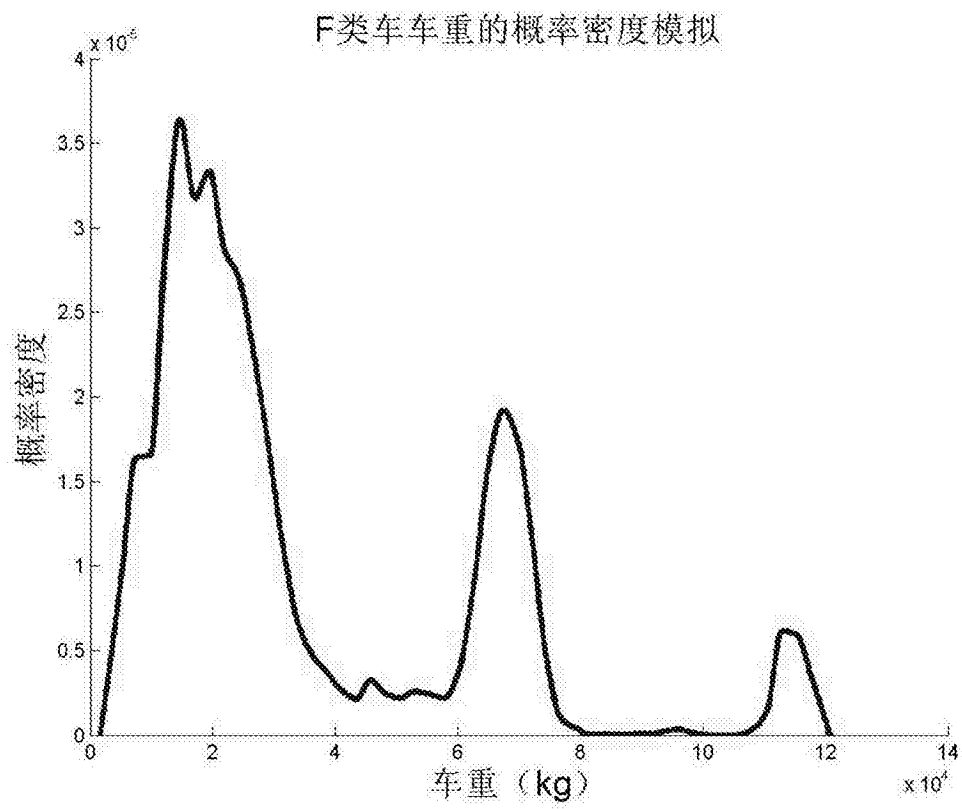


图 10

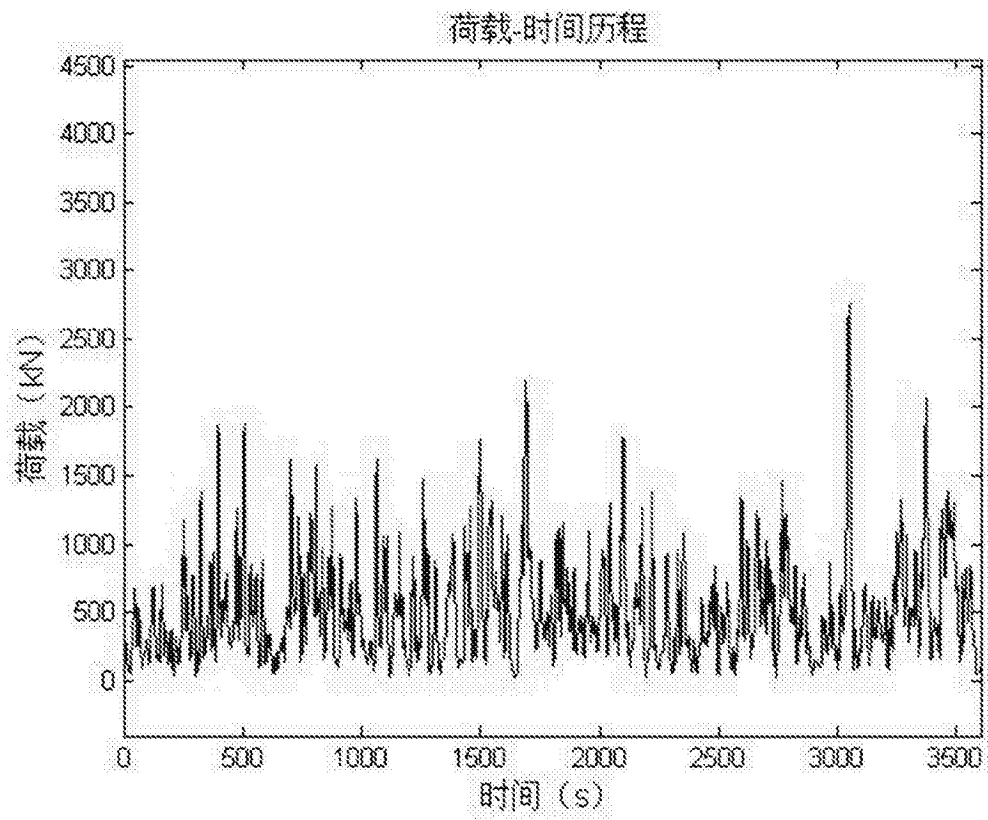


图 11

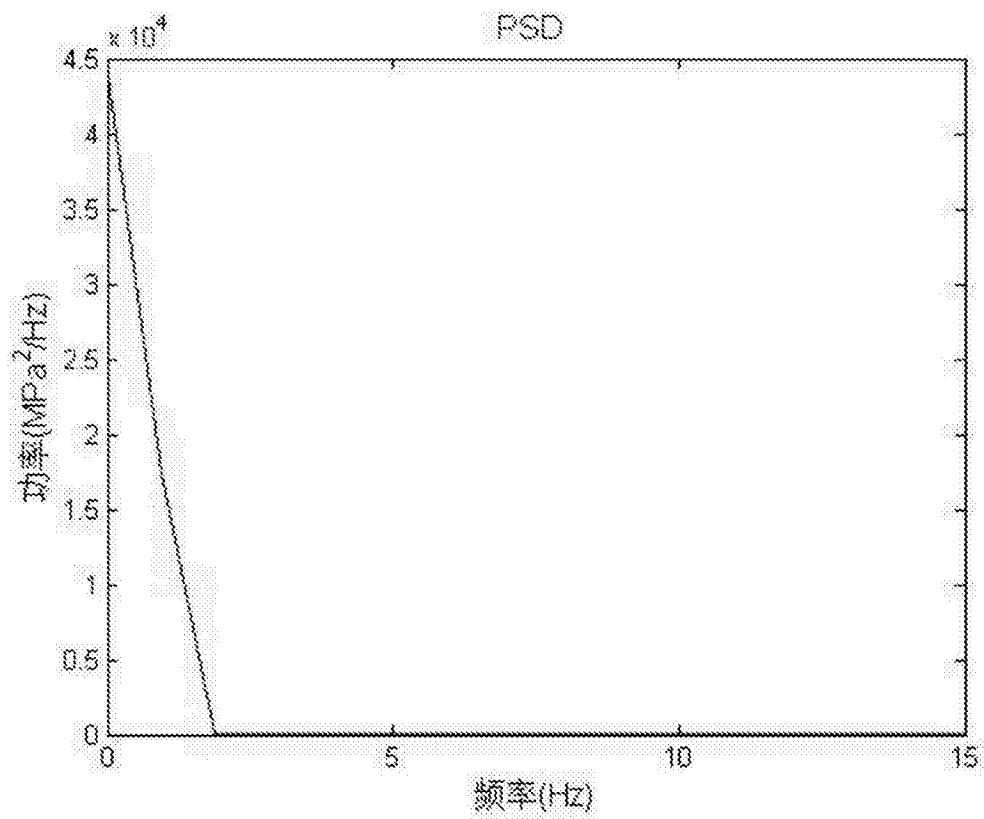


图 12

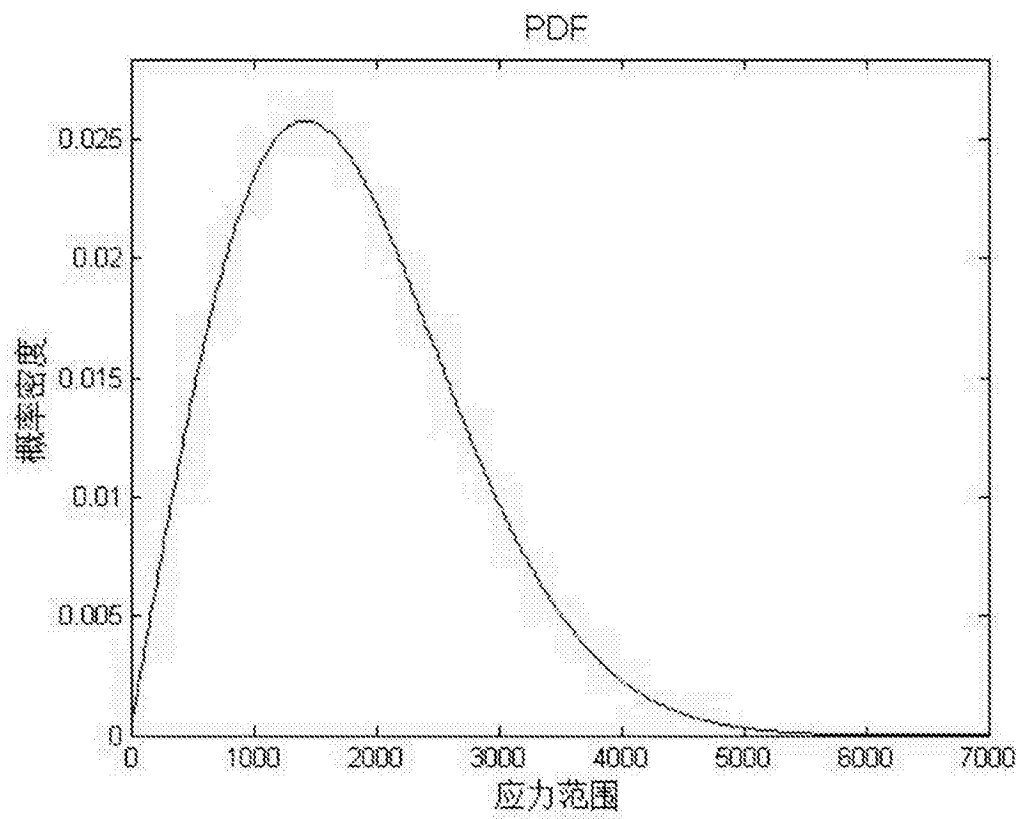


图 13