



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113434954 B

(45) 授权公告日 2022. 09. 20

(21) 申请号 202110661532.X

(22) 申请日 2021.06.15

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113434954 A

(43) 申请公布日 2021.09.24

(73) 专利权人 同济大学  
地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 吴荻非 刘成龙 杜豫川 覃伯豪

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

专利代理师 丁云

(51) Int. Cl.

G06F 30/15 (2020.01)

G06F 30/20 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 104120644 A, 2014.10.29

CN 101629895 A, 2010.01.20

CN 109629380 A, 2019.04.16

CN 104790283 A, 2015.07.22

CN 111580494 A, 2020.08.25

Chenglong Liu. Large-scale pavement roughness measurements with vehicle crowdsourced data using semi-supervised learning. 《Transportation Research Part C 125 (2021) 103048》. 2021, 1-14页.

杜豫川. 新一代智慧高速公路系统架构设计. 《中国公路学报》. 2021, 1-18页.

杜豫川. 基于车载多传感器的路面平整度检测方法. 《中国公路学报》. 2015, 1-5页.

审查员 贾超

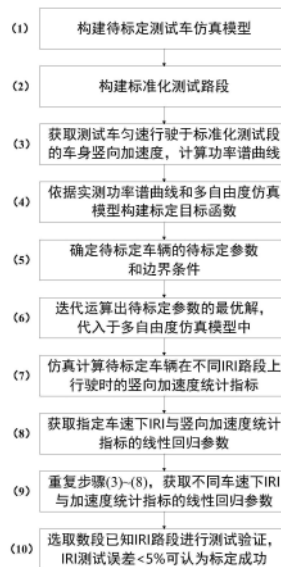
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

## (54) 发明名称

一种振动式路面平整度测试车的标定方法

## (57) 摘要

本发明涉及一种振动式路面平整度测试车的标定方法,包括以下步骤:S1:构建待标定测试车的多自由度振动仿真模型,并确定初始模型参数;S2:构建标准化标定路段;S3:将待标定测试车在不同车速下驶过标准化标定路段获取实测数据,构建标定目标函数并进行迭代计算,获取标定参数的最优解,获取不同车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数;S4:进行测试验证,判断是否标定成功。与现有技术相比,本发明结合整车仿真、迭代计算方法,标定快速、便捷、准确。



1. 一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1: 构建待标定测试车的多自由度振动仿真模型,并确定初始模型参数;

S2: 构建标准化标定路段;

S3: 将待标定测试车在不同车速下驶过标准化标定路段获取实测数据,构建标定目标函数并进行迭代计算,获取标定参数的最优解,获取不同车速下IRI与仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数;

S4: 在已知IRI路段上对线性回归参数进行测试验证,获取IRI测试误差,若IRI测试误差小于误差阈值,则判断标定成功,

所述的步骤S3具体包括:

S31: 将待标定测试车在指定车速下行驶经过所述标准化标定路段,获取实测车身竖向加速度,计算所述车身竖向加速度的实测功率谱曲线;

S32: 依据所述实测功率谱曲线和所述多自由度仿真模型构建标定目标函数;

S33: 确定所述待标定测试车的待标定参数和边界条件;

S34: 依据所述标定目标函数和所述待标定参数、边界条件进行迭代计算,获取待标定参数的最优解;

S35: 将所述待标定参数的最优解代入所述多自由度振动仿真模型中,构建不同IRI的标定用仿真路段,计算所述待标定测试车在指定车速行驶下的左右轮上方的仿真竖向加速度统计指标;

S36: 计算指定车速下IRI与仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数;

S37: 重复步骤S31~S36,获取不同指定车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数。

2. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的目标函数为:

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left( P_{s\_left}(i) - P_{m\_left}(i) \right)^2 + \left( P_{s\_right}(i) - P_{m\_right}(i) \right)^2 \right]$$

其中,n为频段数量, $P_{s\_left}(i)$ 为第i个频段上仿真得到的左后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{m\_left}(i)$ 为第i个频段上实测得到的左后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{s\_right}(i)$ 为第i个频段上仿真得到的右后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{m\_right}(i)$ 为第i个频段上实测得到的右后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值。

3. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的多自由度整车振动仿真模型的自由度数量 $N=7+N_p$ ,其中,N为自由度数量, $N_p$ 为车内作业人数。

4. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的待标定振动参数包括悬架弹簧刚度、悬架阻尼、座椅弹簧、座椅阻尼、车身质量等参数中的一种或数种,所述边界条件为所述待标定振动参数的取值范围。

5. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的迭代计算的方法为多目标粒子群算法或遗传算法或非线性最小二乘法计算。

6. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述

的线性回归参数采用二元线性拟合获取,包含三个参数,分别为左轮竖向加速度统计指标的系数、右轮竖向加速度统计指标的系数和常数项,如下式所示:

$$IRI = a \cdot X_{\text{left}} + b \cdot X_{\text{right}} + c$$

其中,IRI为国际平整度指数, $X_{\text{left}}$ 和 $X_{\text{right}}$ 分别为左轮、右轮竖向加速度统计指标, $a$ , $b$ , $c$ 为回归系数。

7. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的待标定测试车上设有用于获取实测车身竖向加速度的车载加速度计。

8. 根据权利要求1所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的标准化标定路段包括一段 $IRI < 2$ 的平整路面和一个凸起的标定块。

9. 根据权利要求8所述的一种振动式路面平整度测试车的标定方法,其特征在于,所述的标定块沿行驶方向的长度范围为 $10 \sim 50 \text{cm}$ ,所述的标定块沿行驶方向的中间最高处高度范围为 $5 \sim 15 \text{cm}$ ,所述的标定块沿行驶方向两端最低处于路面齐平。

## 一种振动式路面平整度测试车的标定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及道路工程领域,尤其是涉及一种振动式路面平整度测试车的标定方法。

### 背景技术

[0002] 振动式路面平整度测试车是近年来新兴的路面平整度检测设备,通过实测车辆行驶过程中车身的加速度数据,可用以计算并评估行驶路段的平整度。然而在实际测量过程中,不同的车辆、加速度数据的测量位置均会对测量结果产生显著影响。因此,在开展平整度检测作业之前,首先需要对该测试车进行标定。

[0003] 现有的振动式路面平整度测试车多采用国际平整度指标(IRI)作为检测指标,通过计算车身振动加速度的均方根值、功率谱或者傅里叶频谱幅值等参数,通过线性回归可计算得到IRI。传统的测试车标定方法通常关注上述参数与IRI指标的线性关系,通过在大量已知IRI的路段上进行实测来计算线性关系的相关参数,进而对测试车进行标定。但该方法需要大量的标定测试工作,操作繁琐,是制约振动式路面平整度测试车推广应用的瓶颈问题之一。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种振动式路面平整度测试车的标定方法。

[0005] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0006] 一种振动式路面平整度测试车的标定方法,包括以下步骤:

[0007] S1:构建待标定测试车的多自由度振动仿真模型,并确定初始模型参数;

[0008] S2:构建标准化标定路段;

[0009] S3:将待标定测试车在不同车速下驶过标准化标定路段获取实测数据,构建标定目标函数并进行迭代计算,获取标定参数的最优解,获取不同车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数;

[0010] S4:在已知IRI路段上对线性回归参数进行测试验证,获取IRI测试误差,若IRI测试误差小于误差阈值,则判断标定成功。

[0011] 优选地,所述的步骤S3具体包括:

[0012] S31:将待标定测试车在指定车速下行驶经过所述标准化标定路段,获取实测车身竖向加速度,计算所述车身竖向加速度的实测功率谱曲线;

[0013] S32:依据所述实测功率谱曲线和所述多自由度仿真模型构建标定目标函数;

[0014] S33:确定所述待标定测试车的待标定参数和边界条件;

[0015] S34:依据所述标定目标函数和所述待标定参数、边界条件进行迭代计算,获取待标定参数的最优解;

[0016] S35:将所述待标定参数的最优解代入所述多自由度振动仿真模型中,构建不同

IRI的标定用仿真路段,计算所述待标定车辆在指定车速行驶下的左右轮上方的仿真竖向加速度统计指标;

[0017] S36:计算指定车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数;

[0018] S37:重复步骤S31~S36,获取不同指定车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数。

[0019] 优选地,所述的目标函数为:

$$[0020] \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left( P_{s\_left}(i) - P_{m\_left}(i) \right)^2 + \left( P_{s\_right}(i) - P_{m\_right}(i) \right)^2 \right]$$

[0021] 其中,n为频段数量, $P_{s\_left}(i)$ 为第i个频段上仿真得到的左后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{m\_left}(i)$ 为第i个频段上实测得到的左后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{s\_right}(i)$ 为第i个频段上仿真得到的右后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{m\_right}(i)$ 为第i个频段上实测得到的右后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值。

[0022] 优选地,所述的多自由度整车振动仿真模型的自由度数量 $N=7+N_p$ ,其中,N为自由度数量, $N_p$ 为车内作业人数。

[0023] 优选地,所述的待标定振动参数包括悬架弹簧刚度、悬架阻尼、座椅弹簧、座椅阻尼、车身质量等参数中的一种或数种,所述边界条件为所述待标定振动参数的取值范围。

[0024] 优选地,所述的迭代计算的方法为多目标粒子群算法或遗传算法或非线性最小二乘法计算。

[0025] 优选地,所述的线性回归参数采用二元线性拟合获取,包含三个参数,分别为左轮竖向加速度统计指标的系数、右轮竖向加速度统计指标的系数和常数项,如下式所示:

$$[0026] \quad IRI = a \cdot X_{left} + b \cdot X_{right} + c$$

[0027] 其中,IRI为国际平整度指数, $X_{left}$ 和 $X_{right}$ 分别为左轮、右轮竖向加速度统计指标,a,b,c为回归系数。

[0028] 优选地,所述的待标定测试车上设有用于获取实测车身竖向加速度的车载加速度计。

[0029] 优选地,所述的标准化标定路段包括一段 $IRI < 2$ 的平整路面和一个凸起的标定块。

[0030] 优选地,所述的标定块沿行驶方向的长度范围为10~50cm,所述的标定块沿行驶方向的中间最高处高度范围为5~15cm,所述的标定块沿行驶方向两端最低处于路面齐平。

[0031] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0032] (1) 本发明结合整车仿真及迭代计算方法,对待标定测试车进行多次测试,计算其线性回归参数,为测试车标定提供了快速、便捷、准确的标定方法,相较于传统的标定方法,本方法具备操作便捷、测试方便的优势,有利于振动式路面平整度检测车的推广应用。

[0033] (2) 本发明的标准化标定路段上设置的标定块能够保证至少覆盖一个车轮。所述标定块需固定于路面上,确保为实车测试提供完整的测试环境;

[0034] (3) 现有的振动式路面平整度检测车辆标定过程需要选取不同平整度的路段,并实测大量的样本数据进行回归分析,本方法基于车辆的多自由度仿真理论和最优化计算方法,将部分实测工作替代为仿真模拟,可大大减少标定过程的实测工作量,有效提升振动式路面平整度检测车辆的标定效率。

## 附图说明

- [0035] 图1为本发明的实施例中标定方法的流程图；
- [0036] 图2本发明构建的待标定测试车的多自由度振动仿真模型；
- [0037] 图3为本发明用以构建标准化标定路段的圆弧形凸起标定块；
- [0038] 图4为本发明用以构建标准化标定路段的梯形凸起标定块；
- [0039] 图5为本发明用以构建标准化标定路段的三角形凸起标定块；
- [0040] 图6为实施例中所采用的标定块；
- [0041] 图7为实施例中实测的加速度数据；
- [0042] 图8为实施例中的迭代计算过程。
- [0043] 其中,1、轮胎刚体；2、车身刚体；3、座椅刚体；4、轮胎弹簧；5、悬架弹簧；6、座椅弹簧；7、悬架阻尼；8、座椅阻尼；9、圆弧形凸起标定块；10、梯形凸起标定块；11、三角形凸起标定块。

## 具体实施方式

[0044] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。注意,以下的实施方式的说明只是实质上的例示,本发明并不意在对其适用物或其用途进行限定,且本发明并不限定于以下的实施方式。

[0045] 实施例

[0046] 一种振动式路面平整度测试车的标定方法,包括以下步骤:

[0047] 如图1所示,本发明提供了一种振动式路面平整度检测车的快速标定方法,具体如下:

[0048] (1) 构建待标定测试车的多自由度振动仿真模型,并确定初始模型参数。

[0049] 所述多自由度振动仿真模型如图2所示,为质量-弹簧-阻尼振动模型,可采用Matlab、Python、C++、C#等平台构建。所述多自由度振动仿真模型的自由度数量按照 $N=7+N_p$ 计算,其中 $N_p$ 为车载人数。图2所示的仿真模型包含了4个轮胎刚体1,1个车身刚体2以及数个座椅刚体3。假设测试过程中仅有驾驶员1人,则仿真模型的自由度包括:左前轮胎垂直运动、右前轮胎垂直运动、左后轮胎垂直运动、右后轮胎垂直运动、车身刚体2垂直运动、车身刚体2俯仰运动、车身刚体2侧倾运动、座椅竖向运动。该仿真模型中所采用的弹簧和阻尼分别为线性弹簧和线性阻尼。

[0050] (2) 构建用于振动式路面平整度测试车的标准化标定路段。

[0051] 所述标准化标定路段用途在于标定获取步骤(1)中所述多自由度振动仿真模型的模型参数,包括各弹簧系数和阻尼系数等。上述模型参数与所述多自由度振动仿真模型的频响特征相关,为有效获取频响特征,通常可采用冲击测试方法。因此,本发明采用如图3~5所示的凸起标定块构建标准化标定路段。待标定测试车经过所述标准化标定路段时,车受到竖向的冲击作用,可用以分析上述频响特征。所述标定块可以为三角形凸起标定块11、圆弧形凸起标定块9或梯形凸起标定块10。所述标定块沿行驶方向长度范围为10~50cm,中间最高处高度范围为5~15cm,两端最低处于路面齐平。所述标定块沿行驶垂直方向的宽度需大于30cm,保证至少覆盖一个车轮。所述标定块需固定于路面上,在车轮经过时不发生较大变形。

[0052] (3) 将待标定测试车在指定车速下行驶经过所述标准化标定路段,获取实测车身竖向加速度,随后计算所述车身竖向加速度的实测功率谱曲线。

[0053] 车身竖向加速度由车载加速度计采集获取,采集位置位于左右后轴轮上方。为有效获取较高频的信息,加速度计的采样频率不小于200Hz。此外,所述指定车速考虑了检测车的行驶车速,通常在10~80km/h之间。

[0054] (4) 依据所述实测功率谱曲线和所述多自由度仿真模型构建标定目标函数。所述标定目标函数表示了仿真结果与实测结果的差异大小,本发明采用如下所示的目标函数:

$$[0055] \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left( P_{s\_left}(i) - P_{m\_left}(i) \right)^2 + \left( P_{s\_right}(i) - P_{m\_right}(i) \right)^2 \right]$$

[0056] 其中,n为频段数量, $P_{s\_left}(i)$ 为第i个频段上仿真得到的左后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{m\_left}(i)$ 为第i个频段上实测得到的左后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{s\_right}(i)$ 为第i个频段上仿真得到的右后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值, $P_{m\_right}(i)$ 为第i个频段上实测得到的右后轴轮上方加速度在频域上的平均幅值,所述加速度在频域上的平均幅值为加速度功率谱幅值或加速度频谱幅值的平均值,所述频段宽度可以为5~10Hz。对应的总频段范围通常为0~100Hz。

[0057] (5) 确定所述待标定车辆的待标定参数和边界条件。本发明所述待标定振动参数包括悬架弹簧5刚度、悬架阻尼7、座椅弹簧6、座椅阻尼8、车身质量等参数中的一种或数种,所述边界条件为所述待标定振动参数的取值范围。在实际测试过程中,通常仅将悬架弹簧5刚度、悬架阻尼7作为待标定参数。座椅参数对于车身振动影响较小,可直接粗略估计并选用。车身质量可按照车辆型号查询输入,对于改装车辆等特殊应用场景,可将其作为待标定参数。

[0058] (6) 依据所述标定目标函数和所述待标定参数和边界条件进行迭代计算,获取待标定参数的最优解。

[0059] 本发明中所述待标定振动参数包括悬架弹簧5刚度、悬架阻尼7、座椅弹簧6、座椅阻尼8、车身质量等参数中的一种或数种,所述边界条件为所述待标定振动参数的取值范围。在进行迭代计算时,可采用多目标粒子群算法、遗传算法、非线性最小二乘法计算。采用上述迭代计算方法时,所述待标定参数初始值设置为100组,依据所述边界条件随机生成。而当采用非线性最小二乘法计算时,计算方法采用Levenberg-Marquardt方法。迭代计算过程中,迭代次数一般不超过500次,当目标函数小于容许误差或达到最大迭代次数时停止迭代,取100组标定参数中的最优解作为最终的标定参数。

[0060] (7) 将最终的标定参数代入所述多自由度振动仿真模型中,构建不同IRI的标定用仿真路段,计算所述待标定车辆在指定车速行驶下的左右轮上方的仿真竖向加速度统计指标。所述加速度统计指标可以为可选用均方根、加权均方根、傅里叶变换频谱的幅值等,其中较为常用的是加权均方根值。在构建不同IRI的标定用仿真路段时,仿真路段应覆盖不同大小的平整度。因此要求标定用仿真路段的IRI范围需要覆盖1.0~7.0,路段数量通常为50~100段,每段长度不短于500m。仿真路段的路面高程信息可采用实测高程数据,也可采用功率谱叠加法自动生成。

[0061] (8) 采用线性回归分析,获取在所述指定车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指

标的线性回归参数。所述线性回归参数采用二元线性拟合获取,包含三个参数,分别为左轮竖向加速度统计指标的系数、右轮竖向加速度统计指标的系数和常数项,如下式所示。

$$[0062] \quad IRI = a \cdot X_{left} + b \cdot X_{right} + c$$

[0063] 其中,IRI为国际平整度指数, $X_{left}$ 和 $X_{right}$ 分别为左轮、右轮竖向加速度统计指标, $a, b, c$ 为回归系数。

[0064] (9) 重复步骤(3)~(8),获取不同指定车速下IRI与所述仿真竖向加速度统计指标的线性回归参数。在进行不同车速标定时,可以以10km/h为所示指定车速的测试间隔,本实施例中,采用指定车速分别为10、20、30、40、50、60、70、80km/h,由此生成不同指定车速下的线性回归参数。

[0065] (10) 将步骤(9)的线性回归参数代入待标定车辆中,选取5~8段已知IRI路段开展实测验证:此类路段的IRI应覆盖0~2m/km,2~4m/m,4~6m/km,6~8m/km,8~10m/km等5个区间。分别采用20,40,60km/h车速匀速行驶于上述路段,并根据步骤(9)中回归得到的线性回归参数,代入步骤(8)中的线性模型中计算预测的IRI指标,预测得到的IRI指标与已知IRI指标的平均误差<5%即可认为标定成功。IRI测试误差<5%即可认为标定成功。

[0066] 本发明具体实施时,本实施例选取某双轴小客车作为待标定测试车辆,将加速度传感器分别放置于后轴左右轮上方,采集加速度数据。首先选用梯形标定块,如图6所示,其截面为等腰梯形,高度为5cm,上底边长度为5cm,下底边长度为40cm。构建标准化标定路段,待标定测试车辆以40km/s行驶经过该标准化标定路段,获取左右后轴轮上方的加速度信号,如图7所示。随后采用Matlab构建8自由度整车振动仿真模型,求解过程采用状态空间法迭代求解,求解时间步长设定为0.005s,对应于200Hz的采样频率。并选择轮胎弹簧4刚度、簧下载重、悬架弹簧5刚度、悬架阻尼7这4项参数与簧上载重的比值作为待标定参数,其余参数根据车辆规格手动输入。构建标定目标函数,确定待标定参数边界条件进行迭代求解,直至收敛,图8为迭代求解收敛过程。表1为仿真模型中待标定参数的初始值、取值范围和标定值。建立不同IRI值为1~10的仿真路面,以车辆仿真模型代替实车以40km/h的速度在不同IRI值的路面上行驶,计算车辆竖向加速度统计指标均方根误差RMS。如图7所示,RMS与IRI存在线性相关关系,采用线性拟合算法计算拟合参数。至此,完成标定方法全过程,其余车速下的参数标定方法与上述步骤一致。

[0067] 表1

待标定参数	初始值	取值范围	标定值
悬架弹簧	60	[100, 150]	123.16
悬架阻尼	10	[5, 10]	7.39
轮胎质量	0.15	[0.1, 0.2]	0.17
轮胎刚度	650	[500, 800]	682.65

[0069] 上述实施方式仅为例举,不表示对本发明范围的限定。这些实施方式还能以其它各种方式来实施,且能在不脱离本发明技术思想的范围内作各种省略、置换、变更。



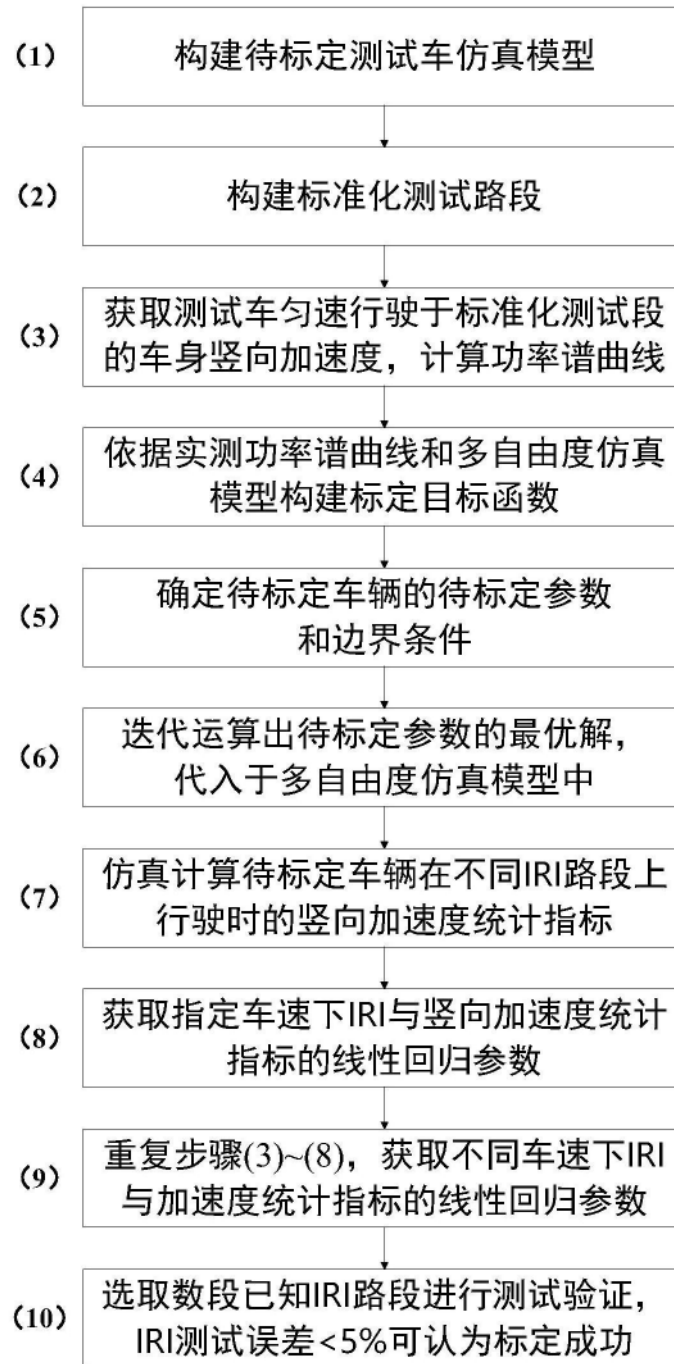


图1

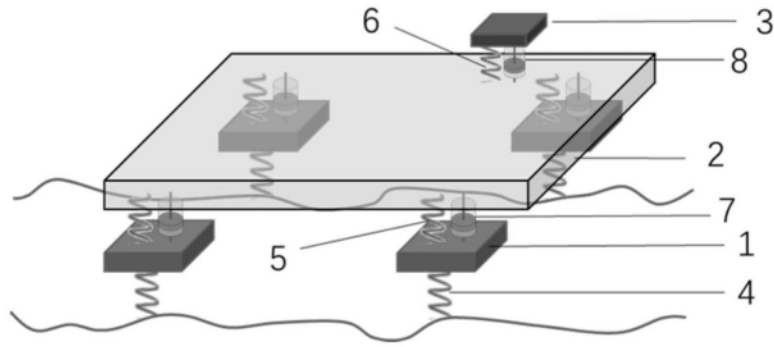


图2

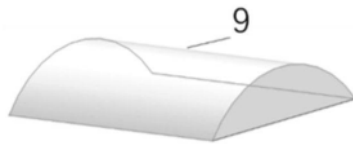


图3

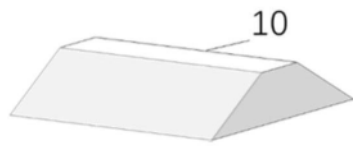


图4

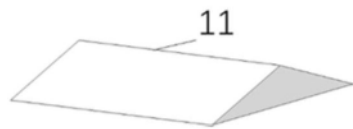


图5

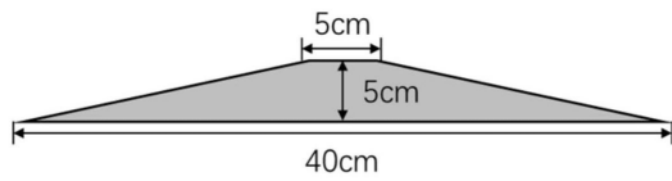


图6

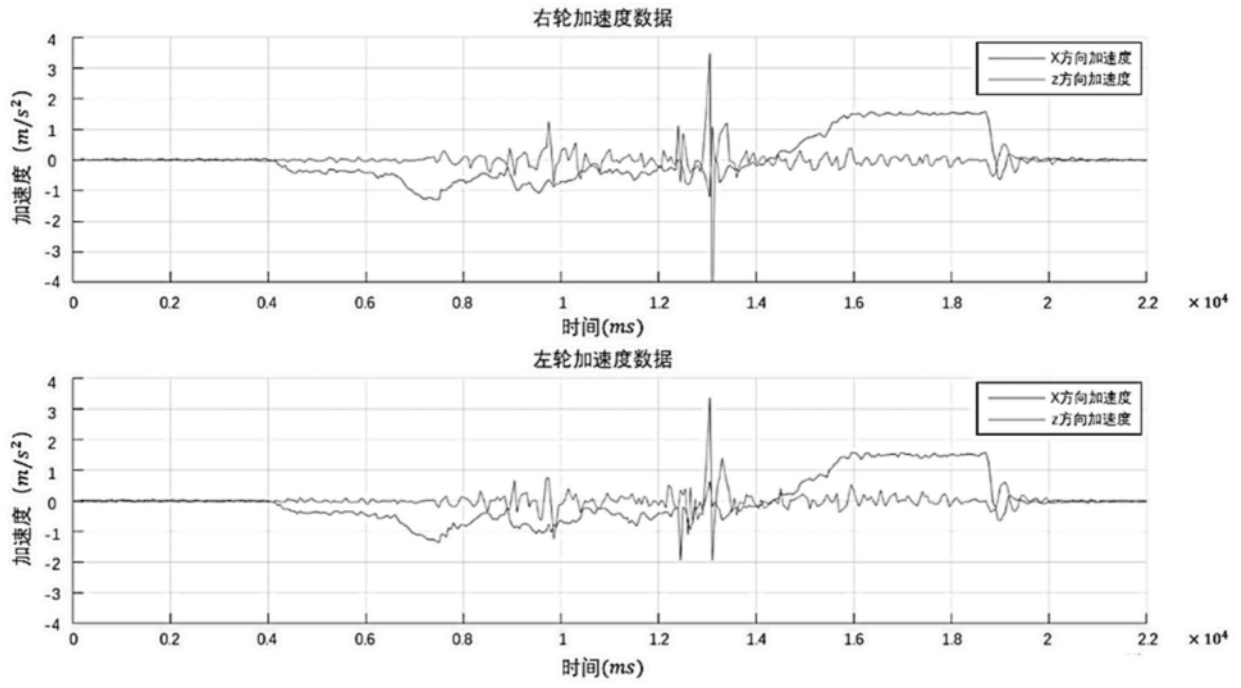


图7

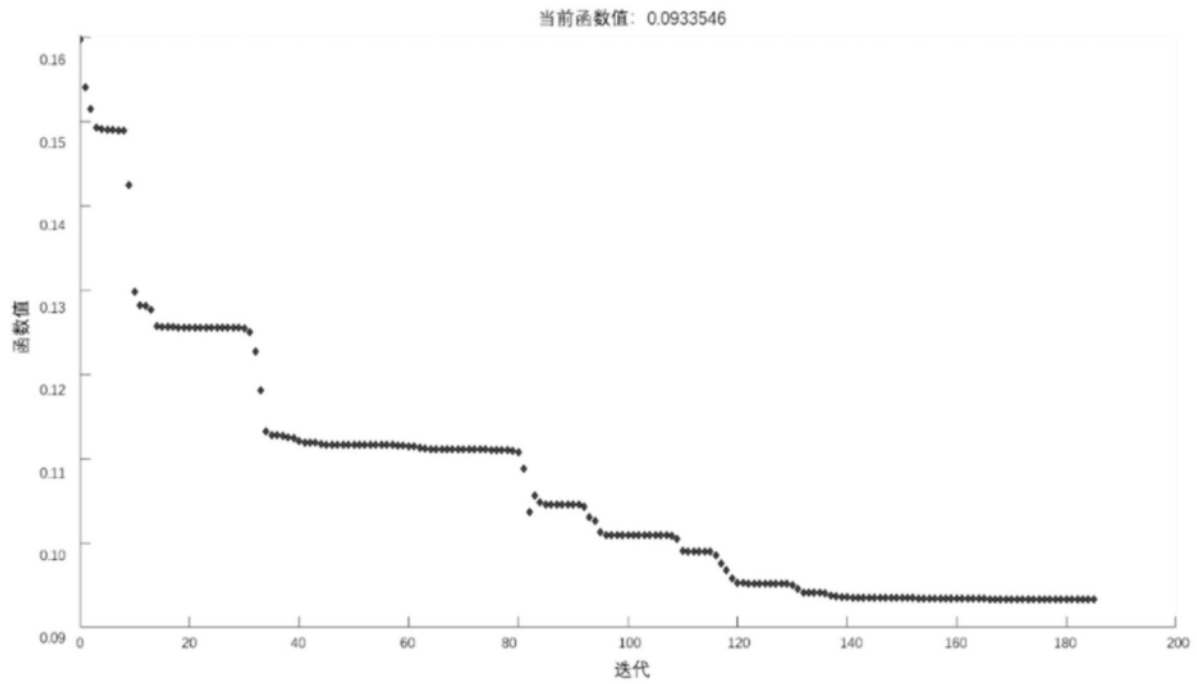


图8