

应用于车辆质心测量的改进侧倾法

李任君¹, 赵一兵², 顾莉栋¹, 谭洪强¹, 宋林森¹, 田岩³

(1. 长春理工大学机电工程学院, 长春 130022; 2. 中国人民解放军63850部队, 白城 137000; 3. 华晨宝马汽车有限公司研发中心, 沈阳 110000)

摘要:应用侧倾法进行汽车质心位置测量时,会出现轮胎受力点计算不准确、车辆侧倾大等问题,本文提出改进侧倾法。在应用改进侧倾法进行车辆质心位置测量时,轮胎受力方向始终竖直向上,不需额外设计轮荷称重装置,可以减小摩擦力等不利因素的影响。为使改进侧倾法中支承板始终保持水平,采用平行四边形机构对其进行约束。根据静力与力矩平衡,建立改进侧倾法的车辆质心测量计算模型,采用数值模拟手段,对系统关键部件进行校核,并对测量过程进行数值模拟分析。研究表明:改进侧倾法设计的平行四边形机构和测试台框架的刚度和强度可以满足安全性要求;在车辆质心位置确定过程中,改进侧倾法车辆的转动角度会较传统测试方法小,所测质心位置精度高且试验安全性好。

关键词:车辆;质心测量;改进侧倾法;数值模拟;转动角度

中图分类号:TH39 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)11-3175-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230621

Improved tilting method for vehicle mass center measurement

LI Ren-jun¹, ZHAO Yi-bing², GU Li-dong¹, TAN Hong-qiang¹, SONG Lin-sen¹, TIAN Yan³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. The No. 63850th Troop of PLA, Baicheng 137000, China; 3. Research and Development Center, BMW-Brilliance Automotive Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: When measuring the position of vehicle mass center by Tilting Method (TM), there would be some problems such as inaccurate calculation of tire force point and large tilting of the vehicle, so Improved Tilting Method (ITM) is proposed in this paper. In the process of measuring the position of vehicle mass center by ITM, the force direction of the tire is always straight up, which does not need to design additional wheel load weighing device and can reduce the influence of adverse factors such as friction. In order to keep the supporting plates horizontal, a parallelogram mechanism is used to constrain them. Based on the balance of static force and moment, the calculation model of ITM is established. By means of numerical simulation, the key components of the system were verified and the measurement process was simulated. The results show that the stiffness and strength of parallelogram mechanism and test bench frame meet the safety requirements. To determine the vehicle mass center, the vehicle tilting angle by ITM

收稿日期:2021-07-14.

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20200401098GX).

作者简介:李任君(1983-),男,讲师,博士.研究方向:智能设计及数据模拟. E-mail:renjun.li@cust.edu.cn

通信作者:顾莉栋(1983-),男,副教授,硕士.研究方向:机械设计及理论. E-mail:gulidong@cust.edu.cn

is smaller than that by TM, which means that ITM can supply higher precision and better experiment safety.

Key words: vehicle; mass center measurement; improved tilting method; numerical simulation; tilting angle

0 引言

车辆的质心位置是非常重要的静态参数,是影响汽车操纵稳定性、平顺性和行驶安全性的重要指标^[1],同时车辆的质心位置对车辆的整体设计与布局也有着重要影响^[2]。目前,关于汽车质心位置测量的方法主要有摇摆法^[3,4]、侧倾法^[5,6]、三点测力法^[7,8]与质量反应法^[9,10]。除此之外,全球学者也对其他车辆质心测量手段进行了探索与研究^[11-15]。侧倾法因其原理简单、试验过程及后处理方便快捷等优点,在航空与车辆质心确定领域应用广泛。侧倾法在确定车辆质心位置时,通过轮荷仪测量轮荷大小或力传感器得到力值分布,再应用力矩平衡计算得到质心在水平面上的坐标;通过试验台转动,轮荷仪或传感器测得的力与角度的重新分布,计算得到车辆的质心高度^[16]。由于车辆质心测量的传统侧倾法在测量过程中需要单独应用轮荷仪或力传感器,其轮胎受力点位置仅靠大致估算,整体车辆质心位置确定不够准确。另外,测量过程中车辆侧倾角度过大,导致质心位置误差大,且试验过程存在一定的危险性。

针对传统侧倾法在测量过程中轮胎受力点不能准确计算、车辆侧倾大等问题,本文提出了应用改进侧倾法(Improved tilting method, ITM)进行汽车质心位置的测量。我们研制了一套可提高测量精度与安全性的车辆质心测量系统,推导建立车辆质心测量计算模型。利用车辆质心测量系统,各传感器可计算得到车轮受力点位置参数,经过坐标变换可以确定车辆质心位置。通过数值模拟与试验研究,验证了改进侧倾法的有效性及其实用性。

1 改进侧倾法车辆质心测量模型

1.1 改进侧倾法的提出

侧倾法(Tilting Method, TM)在进行车辆质心测量时,其工作台转动时车辆与平台同步转动,应用轮荷采集仪器或试验台下的力传感器进行力值采集。由于在转动过程中车辆轮荷的重新分配,轮胎及悬架变形量会出现不同程度的改变。

另外,由于车辆内燃油等液体液面也会随着车辆侧倾产生变化,最终质心位置会产生一定的误差。侧倾法测量车辆质心位置如图1所示。

与传统侧倾法不同,改进侧倾法主要包含两大机械功能系统:一是用于支承车辆轮胎的支承系统;二是使整体试验台转动的动力系统。支承系统采用平行四边形机构,在车辆侧倾的过程中,其支承板始终保持水平,此支承系统可以减小摩擦力及侧倾等影响并增加试验安全性。动力系统通过整体试验台板的转动,带动支承板使车辆产生侧向转动。

改进侧倾法在测量车辆质心位置时,虽然试验台板在动力驱动装置作用下会产生转动,支承板会产生一定的垂向运动,但其与轮胎接触面在平行四边形机构的约束下会始终保持水平,最终轮胎受力也始终竖直向上。改进侧倾法测量车辆质心位置如图2所示。改进侧倾法试验装置由试验台板动力系统、平行四边形机构支承系统及数据采集系统等构成。试验台板动力系统提供台板转动动力,是改进侧倾法试验平台的总体承载部分。本文采用电动缸驱动试验台板转动。在进行车辆质心位置测量时,试验台板转动角度可通过

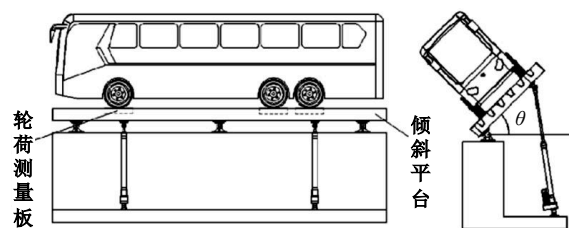


图1 侧倾法测量车辆质心过程

Fig. 1 Process of TM for car mass center

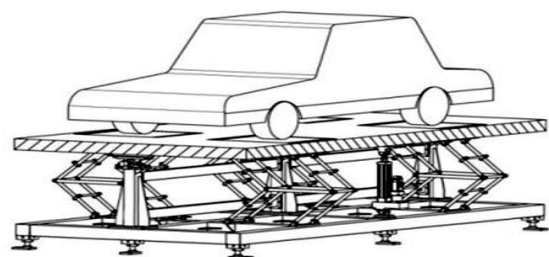


图2 改进侧倾法示意图

Fig. 2 Diagram of improved tilting method

支承板垂向距离换算得到,也可以通过倾角传感器直接测量得到。平行四边形机构支承系统依靠自身特性使支承板保持水平,其与试验台板框架间安装有测力传感器。传感器对力的测量及平面力矩平衡计算,可以得到汽车轮胎受力点准确位置。信息采集方面,改进侧倾法在测量过程中不用采集轮荷信息,而是通过支承板下的测力传感器统一输出数据。

1.2 质心测量的计算模型及计算公式

1.2.1 坐标系说明

(a) 车辆坐标系 O_c

采用文献[17]中对多轴车辆的简化方法对汽车进行简化:假设汽车底盘车架为一刚性物体,计算时不考虑车架的变形;底盘上各车轮及车轮上的悬架等效成弹簧且刚度相同;底盘长度和宽度均远大于底盘在各车轮支承点上最大垂直位移与最小垂直位移之差的绝对值。如图 3 所示为简化后的车辆模型,图中坐标系即为车辆坐标系 O_c 。本文所述方法在全局坐标系下求得质心坐标后,需要通过坐标变换,转换至 O_c 内。

(b) 全局坐标系 O_g

如图 4 所示,在通过试验台铰链中心与支承板表面平行的平面上建立坐标系 O_g 。车轮支承板的宽度为 w_p ,长度为 l_p ,支承板的 x 向间距为 Δx , y 向间距为 Δy 。

(c) 支承板坐标系 O_p

如图 5 所示,建立支承板局部坐标系 O_p ,可将支承板与轮胎接触表面看作二维平面,方向同全局坐标系建立二维坐标系。以支承板上表面传感器投影中心点为圆心 O_p , x 、 y 方向同全局坐标系。在两个方向上,可通过力传感器的值经过力矩平衡得到轮胎的受力点。

根据支承板下力传感器输出,可求解出 O_p 下各轮胎受力点位置。将此位置通过坐标转换与力矩平衡计算,求解出质心在水平面的位置,并最终将这些位置坐标变换至 O_c 下。而质心的高度数值需要试验台板转动一定角度后进行求解,并不需要坐标变换。

1.2.2 质心坐标解算

在车辆坐标系 O_c 中,从车头向车尾看,左侧轮胎编号分别为 1、3,右侧轮胎分别编号为 2、4。支承板编号与车轮编号相对应,分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 。车辆轴距为 L ,轮距为 W ,整车质量为 m 。整车在 O_c 坐标系水平面的质心坐标为 (x, y) 。

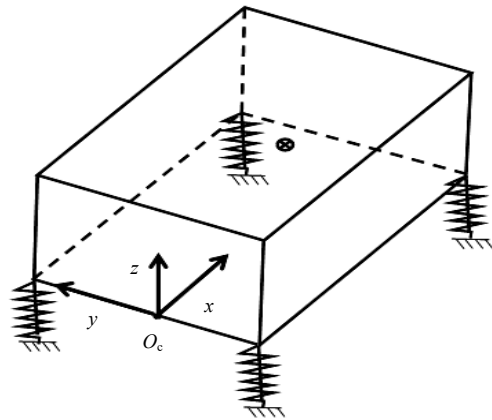


图 3 车辆质心测量简化模型
Fig. 3 Simplified model of vehicle mass center measurement

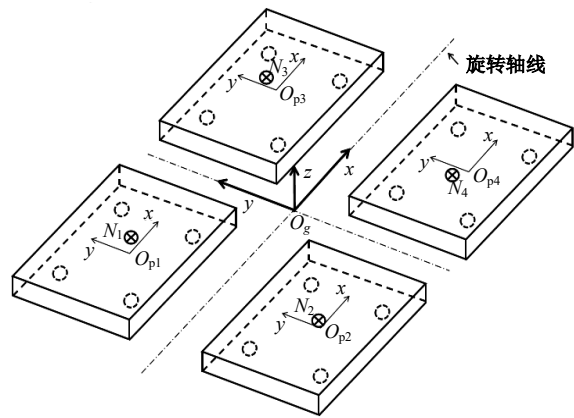


图 4 试验台坐标系 O_g 下的车辆受力图
Fig. 4 Car force in O_g coordinate

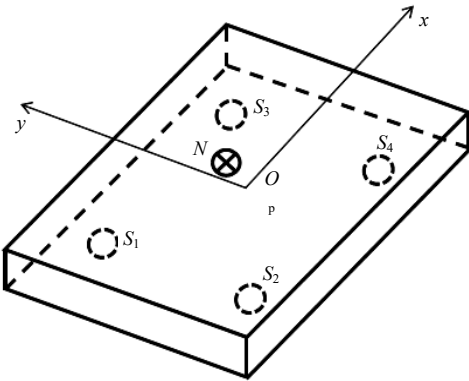


图 5 支承板坐标系 O_p 下的车轮受力图
Fig. 5 Wheel force under O_p coordinate

由车辆力平衡可得:

$$mg = \sum_{i=1}^4 N_i = k \sum_{i=1}^4 \epsilon_i = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 F_{ij} \quad (1)$$

式中: N_i 为支承板对车轮的支承力; k 为车轮和悬架的等效刚度; ϵ_i 为车轮和悬架等效变形量 ($i=1\sim 4$); F_{ij} 为传感器力值 (i 为支承板编号, j 为支承

板下传感器编号)。

由力矩平衡可得 O_g 坐标系下车辆质心水平面的坐标 (x, y) 为:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i=1}^4 x_i N_i}{mg} \\ y = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i N_i}{mg} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_i, y_i 为轮胎受力点在 O_g 坐标系下的位置。

整体来看,改进侧倾法在确定质心水平位置时与传统方法过程相同。但改进侧倾法是通过支承板下均布的传感器侧出力值,车辆的受力点可以由此准确计算得出。因此,改进侧倾法的准确性更高,而且与数据处理系统连接后可得到质心位置的动态特性。

在测量质心高度坐标时,需要将试验台面进行转动,如图6所示为改进侧倾法质心高度示意图。

将质心点沿车辆坐标系下两个方向进行分解,如图7所示。

由力矩平衡及车辆倾斜过后,质心位置在水平方向变化关系可得:

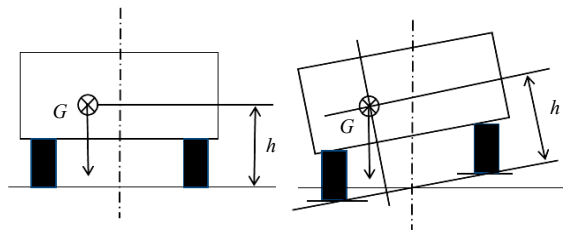


图6 改进侧倾法质心高度示意图
Fig. 6 Height of mass center in ITM

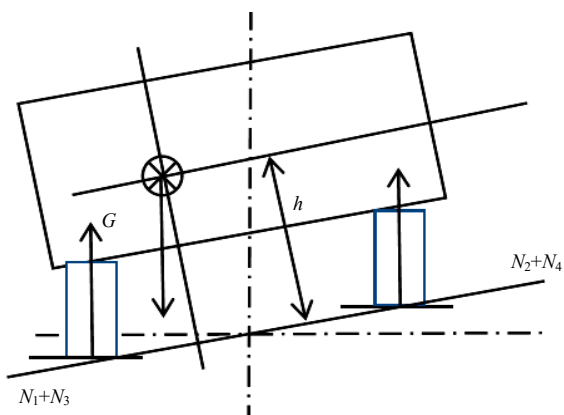


图7 车辆质心高度求解
Fig. 7 Height calculation in vehicle mass center

$$h = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i N_i - (N_2 + N_4) W}{mg \sin \theta} \quad (3)$$

式中: θ 为车辆的转动角度; h 为被测车辆质心高度; $N_1 p_1$ 为支承力; $N_3 p_3$ 为支承力。

其中,车辆在试验台面转动过程中的转动角度 θ 可由安装在车辆上的倾角传感器测量得到。为简化计算,此处假定试验台转角与车辆转角相同。通过式(3)可知,在应用改进侧倾法进行车辆质心测量过程中,因为车辆转动角度易获得,所以车辆的轮荷可直接通过传感器读数得到,测量过程简单灵活。

1.2.3 质心坐标变换

如图5所示,以第 i 个车轮支承板为研究对象,设该支承板下第 j 个传感器在 O_p 下的坐标为 (x_{ij}, y_{ij}) , 轮胎受力点位置为 (x_{ip}, y_{ip}) 。文献[12]采用举升法对车辆质心进行确定,然而其在轮胎受力点位置计算时原理同改进侧倾法,即根据力矩平衡方程,得到 O_p 下的轮胎受力点坐标为:

$$\begin{cases} x_{ip} = \frac{\sum_{j=1}^4 x_{ij} F_{ij}}{\sum_{j=1}^4 F_{ij}} \\ y_{ip} = \frac{\sum_{j=1}^4 y_{ij} F_{ij}}{\sum_{j=1}^4 F_{ij}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_{ip}, y_{ip} 为轮胎受力点 x, y 坐标; x_{ij}, y_{ij} 为第 j 个传感器位置坐标; F_{ij} 为第 j 个传感器的测量值。

当得到二维坐标系 O_p 下4个受力点位置后,需要做一次坐标变换,将点坐标转换到全局坐标系 O_g 下。通过式(6),得到四轮胎受力点在全局坐标系 O_g 下的坐标为:

$$\begin{cases} x_{ig} = \frac{\sum_{j=1}^4 x_{ij} F_{ij}}{\sum_{j=1}^4 F_{ij}} + \frac{\Delta x + l_p}{2} \\ y_{ig} = \frac{\sum_{j=1}^4 y_{ij} F_{ij}}{\sum_{j=1}^4 F_{ij}} + \frac{\Delta y + w_p}{2} \end{cases} \quad (7)$$

得到轮胎受力点坐标后,将其代入式(2)中,即可得 O_g 下车辆质心水平坐标 (x_g, y_g) 。根据图

3对车辆模型的简化,易知由全局坐标系转换至车辆坐标系下 (x_c, y_c) 为:

$$\begin{cases} x_c = x_g + \frac{x_{1g} + x_{2g}}{2} \\ y_c = y_g + \frac{y_{1g} + y_{2g}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

经过求解的质心坐标,即可求得车辆坐标系下的质心水平面坐标。

1.3 质心测量流程及数据处理过程

在应用改进侧倾法进行车辆质心位置确定时,需要先对系统进行检查,包括空板标定与系统自检。检查完成后先求出质心在水平面的坐标,然后试验台板转动,求解质心高度坐标。如图8所示为应用改进侧倾法进行车辆质心位置确定的系统流程图。

质心确定过程的几个关键步骤说明。

空板标定:空板标定是为了在正式测量之前,对系统状态进行检查,根据传感器的输出状态,确定系统运转是否正常。标定过程,可根据要求采用“完全”空板或放置相应重物的方式进行,根据测量原理与传感器输出,最终确定系统状态。

水平状态操作:在正式测量时,车辆被放置在试验支承板上。通过倾角传感器,可以评估台板是否水平,也可以通过评估支承板水平状态判断。

倾斜状态操作:在得出水平状态质心位置后,转动试验台板,使车辆产生一定倾斜状态。此过程结合传感器输出与转动角度,可计算出质心的高度。质心高度与坐标系无关,因此无须进行坐标变换。

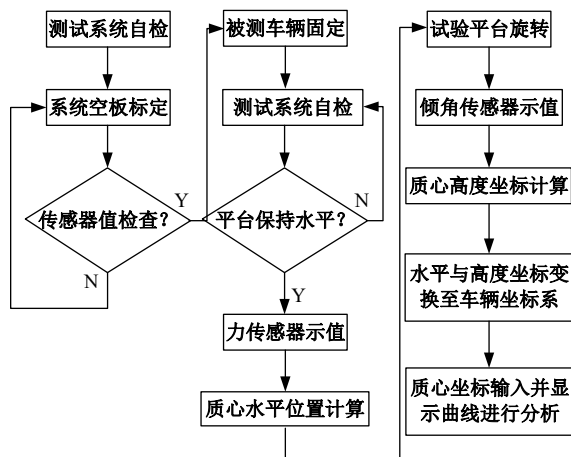


图 8 改进侧倾法测量流程

Fig. 8 Testing process of ITM

2 改进侧倾法的质心测量系统研发

2.1 改进侧倾法总体方案

根据上述改进侧倾法的原理分析,可知该系统由测试台和控制系统组成。测试台为车辆质心测量的机械系统,由台板、支承板与平行四边形机构组成,其功能是测量过程中保证轮胎受力竖直向上。控制系统由各类传感器与控制软件组成。支承板与平行四边形机构均安装在一个底座平台上。考虑到车辆质心位置测量过程中待测车辆上下的方便性与安全性,可将整体测试机构置于地坑中,以使试验台板与地面保持水平。改进侧倾法试验系统整体构成如图9所示。

根据改进侧倾法的测量原理,各测量单元的设计需要满足以下条件:①一个支承单元包括一个支承板、4个力传感器与相应平行四边形机构;②支承板的工作区域,能覆盖车轮受力点位置的变化范围;③为了适应试验台板转动过程中车辆的转动变化,测试台与待测车辆均配置相应倾角传感器;④支承板能够通过传感器值的分布解算出对应车轮受力点的位置。

根据前述改进侧倾法的设计方案,电动缸采用力姆泰克GSX30-0301,其最大静载超过12 kN,满足设备设计要求。支承板下的力传感器采用德国HBM,型号为U10M的力传感器,精度等级为0.02级。倾角传感器采用荷兰DIS,型号为QG76的倾角传感器,精度等级为0.02°,以上选型均满足设计要求。

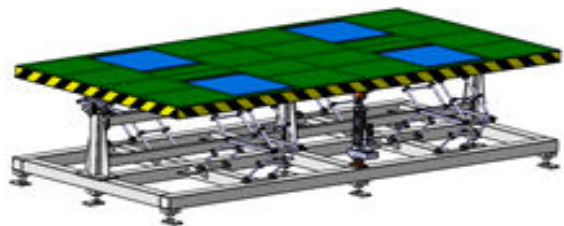
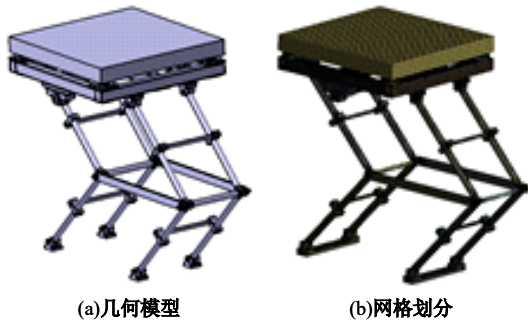


图 9 改进侧倾法测试台方案图

Fig. 9 Design model of ITM test bench

2.2 改进侧倾法数值模拟校核

基于改进侧倾法设计方案,应用数值模拟软件Ansys/workbench对该设计方案中主要机构进行数据模拟校核。支承板下的平行四边形机构非常关键,需要对其进行静力分析与校核。图10为改进侧倾法关键机构数据模拟研究内容,其中,图10(a)为支承板与平行四边形机构的三维图。图10(b)为该机构的网格模型,模型采用实体网格进



(a)几何模型 (b)网格划分

图 10 改进侧倾法平行四边形机构模型

Fig. 10 FE model for parallelogram mechanism

行划分,转轴部分采用转动副模拟,力加载于支承板中心位置。

如图 11 所示为数值模拟结果,其中,图 11(a)为整体试验机构在测试过程中,平行四边形机构垂直向下最大位移时,其等效应力分布情况。图 11(b)为整体试验机构在测试过程中,平行四边形机构垂直向上最大位移时,其等效应力分布情况。

支承板采用 Q235 钢,平行四边形机构关键轴采用高碳铬轴承钢 GCr15。本文中,所有支承板满载重量为 2T 时,转动试验台板,平行四边形机构的最大等效应力为 16 MPa,满足设计要求。

对整体试验台框架进行强度校核,在转动角度为 15° 时,整体框架最大等效应力不超过 40 MPa,相对变形量小于 1 mm,如图 12 所示。由以上分析可知,改进侧倾法试验方案设计的刚度与强度均满足要求。

2.3 改进侧倾法质心测量系统优点

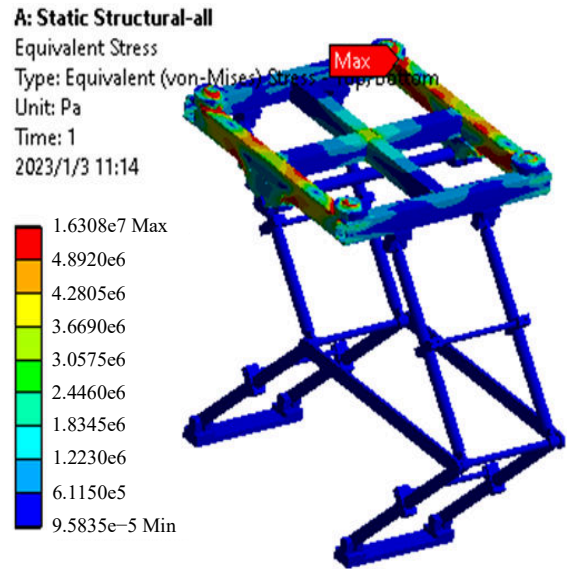
本文介绍的改进侧倾法质心测量系统与其他质心测量系统相比,主要具有以下特点。

2.3.1 轮胎受力点位置准确

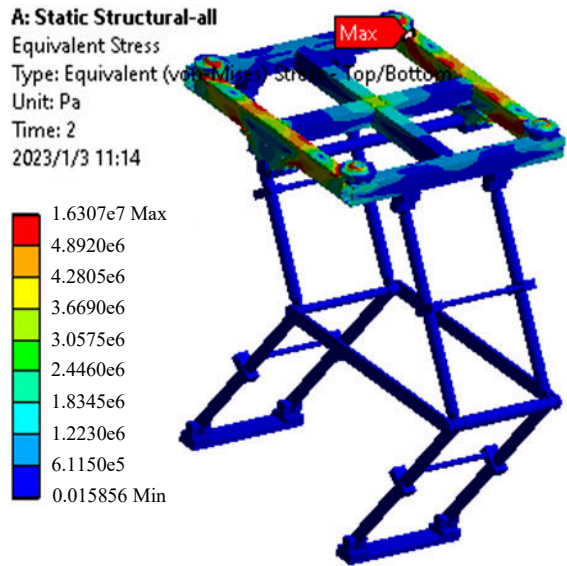
传统侧倾法在轮荷采集过程中,仅能得到轮胎对侧倾机构的压力,而力的位置并没有准确测量,只能进行某些程度的简化,这就使质心位置不够准确。而改进侧倾法不用采集轮荷信息,通过支承板的传感器输出解算出轮胎受力点位置,即使车辆位置未完全对正也影响很小。而且在测量过程中,支承板始终保持水平,简化测力状态,测力简单准确高效。

2.3.2 连续输出,利于评估

传统侧倾法测量轮荷,需要每隔一定角度测量一次,不但误差大,而且测量值不连续。改进侧倾法中传感器测量值连续,即轮胎受力信息与角度呈连续变化状态,最终质心位置的确定与评估



(a)垂直向下最大位移工况



(b)垂直向上最大位移工况

图 11 改进侧倾法平行四边形机构受力状态

Fig. 11 Stress state of parallelogram mechanism

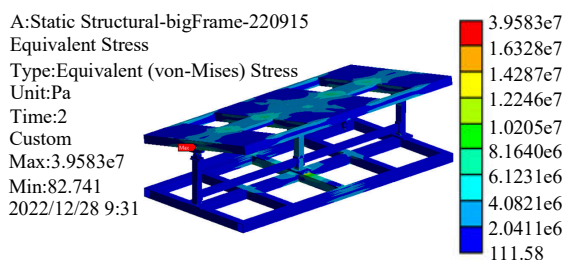


图 12 改进侧倾法测试台框架受力状态

Fig. 12 Stress state of test bench frame

更加合理。

2.3.3 可拓展性好,安全性高

传统侧倾法倾斜角度大,导致侧倾影响大。

而改进侧倾法侧倾角度小,试验会更准确安全。改进侧倾法测量设备可通过简单改装,如将平行四边形机构去掉,并将支承板固定于试验台板上,就可以进行传统侧倾法的质心测量。而通过相应平行四边形机构换向,也可实现应用举升法进行质心测量。

3 数值模拟研究

应用数值模拟手段对改进侧倾法试验过程进行数据模拟,包括测试过程的模拟与转动角度方面的研究。

3.1 改进侧倾法过程验证

图 13(a)为数值模拟模型,整体试验平台下部在数据模拟过程中对数值模拟结果没有影响,为节省数值模拟资源与时间,将此部分省去。

在数值模拟过程中,因为车辆部件结构相对复杂,且过程仅对数据采集、坐标变换及车辆质心坐标求解有要求,所以车辆采用整体模型构建,并将整体车重设为 2 t。车辆轮胎部分进行简化,根据实际车辆悬架刚度及本文研究模型简化的需求,应用刚度较大的弹簧进行代替,其弹簧等效刚度为 2.5e5 N/m。图 13(b)为数据模拟结果图,数值模拟过程体现了改进侧倾法的正确性。

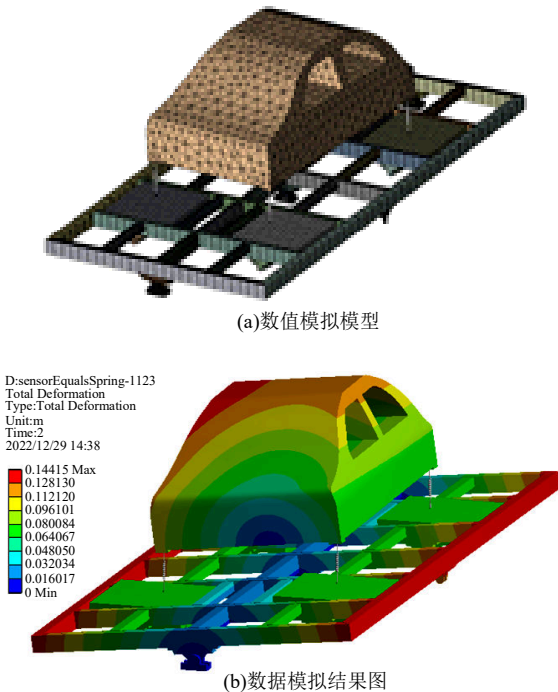


图 13 改进侧倾法数值模拟
Fig13 Simulation for car ITM test process

3.2 转动角度研究

如图 14 所示为试验台转动过程示意图,可知,试验台转动过程中,相当于 ΔOA_1C_1 顶点 O 绕 O 转动一定角度。设右侧 A_1 点下降值为 h_d ,而 A_2 上升值为 h_u 。试验开始前,试验台板处于水平状态,此时三角形一边与水平面夹角为 θ_0 。 $L=A_1C_1=A_2C_1$,为工作台转动中心与支承板转动中心的水平距离, h_0 为试验台转动中心与支承板转动中心的高度差。此试验台中, $L=150\text{ mm}$, $h_0=55\text{ mm}$,可求得 $\theta_0=20^\circ$ 。

上升侧,其角度计算公式为:

$$\frac{(h_u + h_0)}{L} = \sin(\theta + \theta_0) \quad (9)$$

下降侧,角度计算公式为:

$$\frac{(h_d - h_0)}{L} = \sin(\theta - \theta_0) \quad (10)$$

综合式(9)(10),得到试验台转动角度公式为:

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\arcsin \frac{(h_u + h_0)}{L} + \arcsin \frac{(h_d - h_0)}{L} \right) \quad (11)$$

通过数值模拟手段,对试验台板转角、传统侧倾法中车辆转动角度与改进侧倾法中车辆转动角度三者进行对比,结果如图 15 所示,随着试验台板转动角度增大,改进侧倾法中车辆的转动角度较试验台转角要大,而传统侧倾法中车辆转动角

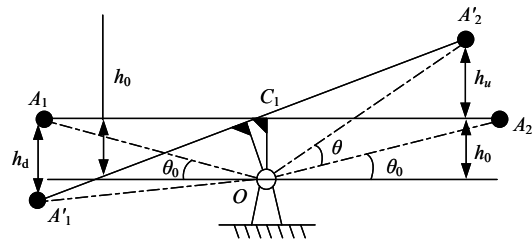


图 14 改进侧倾法试验台板转动角度图
Fig. 14 Rotating angle of ITM test bench

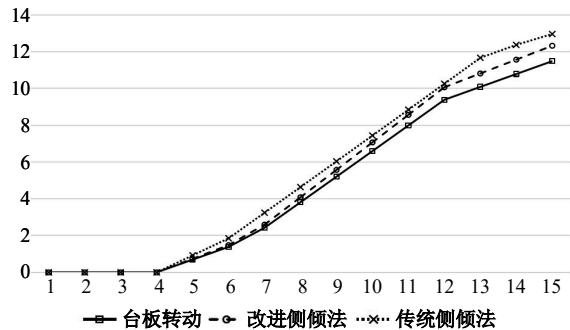


图 15 传统侧倾法、改进侧倾法与试验台转动角度对比
Fig. 15 Angles of car in ITM, TM and test bench

度最大,因此,可见改进侧倾法车辆的侧倾效应会比较传统测试方法小,结果会更准确。

4 试验研究

本文基于改进侧倾法质心测量设计方案,建立了测试系统实物,并对车辆质心测量进行了初步测试,图16为改进侧倾法测量系统实物图。

经过试验系统空板标定、传感器校核等操作后,本文设计的改进侧倾法质心测量系统运行状况良好。下一步将对车辆的质心测量进行实验研究。

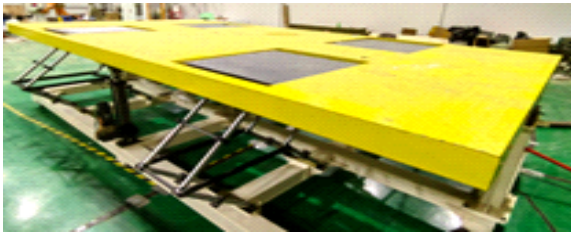


图16 改进侧倾法车辆质心测量系统实物图

Fig. 16 Prototype of ITM

5 结论

(1)本文根据改进侧倾法的质心测量原理,通过力、力矩平衡建立了车辆质心测量系统的计算模型。根据改进侧倾法的质心测量原理,研制了由平行四边形机构保持支承板水平的质心测量系统。

(2)应用数据模拟手段,对改进侧倾法进行部件校核,同时对试验过程进行数据模拟。随着试验台板的转动,改进侧倾法车辆转动角度较侧倾法角度小。因此,改进侧倾法测量过程侧倾小,测量精度高且试验安全性高。

(3)构建了改进侧倾法测试系统原型机,并对车辆质心测量进行了初步测试。试验结果表明,系统运行效果良好,对于下一步车辆质心的测量奠定了良好的基础。

(4)本文所述改进侧倾法质心测量系统,可通过简单拓展实现改进侧倾法、侧倾法与举升法的转换,可大大提升车辆质心测量的交叉验证便利性。除一般家用车辆的质心测量外,设备还可实现多轴车辆等特种车辆的质心位置测量。

参考文献:

[1] 郑德喜. 三轴重型车辆行驶操纵稳定性研究[D]. 秦

皇岛: 燕山大学机械工程学院, 2021.

Zheng De-xi. Research on driving and handling stability of three-axle heavy vehicle[D]. Qinhuangdao: School of Mechanical Engineering, Yanshan University, 2021

[2] 李涛, 卢海波, 林泛业, 等. 质心高度对车辆动力学性能的影响[J]. 汽车实用技术, 2019(3): 110-112.

Li Tao, Lu Hai-bo, Lin Fan-ye, et al. Effect of center of mass height on vehicle dynamic performance[J]. Automotive Practical Technology, 2019(3): 110-112.

[3] Brancati R, Russo R, Savino S. Method and equipment for inertia parameter identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(1): 29-40.

[4] 李俊鹏, 顾宇庆, 陈华杰. 稳定摆法在汽车质心高度测量中的应用及不确定评定[J]. 中国检验检测, 2020, 28(2): 42-45.

Li Jun-peng, Gu Yu-qing, Chen Hua-jie. Application of stable pendulum method in the height measurement of automobile center of mass and uncertainty evaluation [J]. China Inspection and Testing, 2020, 28(2): 42-45.

[5] 杨丽君. 基于侧倾法的车辆质心测量台技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 2015.

Yang Li-jun. Technology research of vehicle center of mass measurement table based on roll method[D]. Harbin: School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, 2015.

[6] 贾晓东, 向飞. 侧倾台测量汽车质心高度的核查方法[J]. 装备制造技术, 2022(4): 95-98.

Jia Xiao-dong, Xiang Fei. Verification method for measuring the height of center of mass of automobile by tilting table[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(4): 95-98.

[7] 唐平建, 孙泽林, 张畔, 等. 基于三点支承的特种车辆质心测量误差分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 234-238.

Tang Ping-jian, Sun Ze-lin, Zhang Pan, et al. Error analysis of centroid measurement of special vehicle based on three-point support[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(7): 234-238.

[8] 钟江, 赵章风, 乔欣, 等. 基于三点支承的质心测量系统及误差分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(12): 1469-1472.

Zhong Jiang, Zhao Zhang-feng, Qiao Xin, et al. Center of mass measurement system and error analysis based on three-point support[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(12): 1469-1472.

[9] 邱银燕, 熊云, 李剑斌. 基于质量反应法的车辆质心

- 位置测量平台研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(9): 88-90.
- Qiu Yin-yan, Xiong Yun, Li Jian-bin. Research on vehicle centroid position measurement platform based on mass response method[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2018, 56(9): 88-90.
- [10] Elaal S M A. Empirical equations to predict the tractor center of gravity[J]. *Ama Agricultural Mechanization in Asia Africa & Latin America*, 2009, 40(3): 64-68.
- [11] Fabbri A, Molari G. Static measurement of the centre of gravity height on narrow-track agricultural tractors [J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(3): 299-304.
- [12] 王德民, 张龙易, 许镇全, 等. 陆行车质心测量机设计与分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2021, 44(3): 76-82.
- Wang De-min, Zhang Long-yi, Xu Zhen-quan, et al. Design and analysis of center of mass measuring machine for land vehicle[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(3): 76-82.
- [13] Zhang Q, Jin X, Zhou K, et al. Novel design method of cog measurement system via supporting reaction method[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2020, 29(2): 251-259.
- [14] Gobbi M, Mastinu G, Previati G. A method for measuring the inertia properties of rigid bodies[J]. *Mechanical Systems&Signal Processing*, 2011, 25(1): 305-318.
- [15] Mastinu G, Gobbi M, Miano C M. The influence of the body inertia tensor on the active safety and ride comfort of road vehicles[J]. *Journal of Passenger Car: Mechanical Systems Journal*, 2002, 111(6): 1980-1990.
- [16] 秦剑文, 李波辉. 两种测量质心高度方法的研究[J]. 装备制造技术, 2020(12): 95-96.
- Qin Jian-wen, Li Bo-hui. Research on two methods for measuring the height of the center of mass[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2020(12): 95-96.
- [17] 丁伟, 高浩, 张坤, 等. 多轴车辆轮荷计算方法研究[J]. 汽车技术, 2014, 469(10): 18-21.
- Ding Wei, Gao Hao, Zhang Kun, et al. Research on calculation method of wheel load for multi-axle vehicle [J]. *Automotive Technology*, 2014, 469(10): 18-21.