

文章编号:1671-6833(2024)01-0029-05

基于整车路面谱的副车架开裂台架试验及仿真

潘公宇¹, 徐锐^{1,2}, 杨晓峰¹

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 恒大新能源汽车全球研究总院, 上海 201620)

摘要:针对前悬架稳定杆与副车架连接处在整车试验场耐久测试过程中出现的疲劳破坏问题,通过对稳定杆进行贴片标定,获得了试验场环境下稳定杆的连杆力和稳定杆扭转相对位移的强化耐久路谱,设计搭建了稳定杆副车架系统的物理台架,并按照耐久性规范进行了台架试验。试验结果表明:该台架试验装置能良好地再现整车耐久路试下的断裂位置,疲劳寿命相对于整车耐久路试的疲劳寿命偏差仅为 2.5%。在此基础上,建立了稳定杆与副车架多体的仿真模型,设定了与系统试验台架相同的约束边界,通过虚拟迭代的方法及准静态有限元疲劳寿命分析法对系统进行了仿真分析。仿真得到稳定杆连杆力和稳定杆扭转相对位移信号,与测试结果进行对比分析可以看出,时域下相位和幅值重合度良好,频域下的 PSD 谱重合度较高,穿级计数载荷统计基本一致,载荷相对损伤均在 1 附近,相关风险位置处的仿真疲劳寿命与整车耐久试验寿命偏差比为 6.25%,获得了较高精度的风险位置载荷,实现了耐久风险位置的复现。最后,基于仿真模型对副车架风险位置处进行了结构优化设计,改进后的方案顺利通过了后续的台架试验和整车耐久路试。

关键词:台架试验;耐久;虚拟迭代;疲劳仿真;相关性

中图分类号:U463

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2023.04.008

耐久性能是汽车零部件开发过程中的一项重要指标。据统计,汽车零部件损坏中大约 90%是由于结构疲劳失效引起的,然而汽车零部件的制造和整车耐久试验会消耗大量时间和经济成本。随着计算机技术的发展,仿真分析和有限元技术可以有效地预测零部件开发过程中的疲劳耐久风险区域、改进结构不合理设计,从而大幅度减少实物试验、缩短整车研发周期、节省试验经费^[1]。

疲劳载荷是支持疲劳耐久试验和仿真的关键输入。当前疲劳载荷的仿真有基于虚拟扫描 3D 路面仿真和基于试验场随机路谱的仿真^[2]。尽管虚拟路面仿真技术可以在不借助物理样车进行试验场路谱采集数据情况下得到相关连接点的疲劳载荷,但在项目实际开发中,整车强化耐久路试中依然会出现一些疲劳耐久风险,需要针对风险位置通过实车路谱采集获取相关试验数据,同时进行物理台架试验和 CAE 仿真来复现和快速验证。

为了快速复现和解决整车耐久路试中发现的问题,本文基于采集的试验场强化耐久路谱,搭建副车

架与稳定杆物理台架,较好地复现了副车架的开裂位置。通过在 Adams 中建立与台架边界相同的虚拟台架,基于虚拟迭代方法获得风险点位置处较高精度疲劳载荷,应用有限元疲劳仿真手段完成结构的虚拟寿命分析,并基于仿真虚拟台架的载荷进行后续副车架相关结构的优化改进验证。由于虚拟台架、物理台架试验及整车耐久路试开裂位置复现具有较高的相关性,后续优化改进验证的台架试验时间和成本得到大幅度减少,产品的耐久开发效率得到有效提高。

1 试验场路谱采集及台架搭建

副车架与稳定杆结构如图 1 所示。在整车强化耐久路试进行 80%过程中,稳定杆与副车架连接螺母附近出现开裂。开裂位置及局部放大图如图 2 所示。裂纹为稳定杆固定螺母垂向挤压副车架本体钣金所导致。开裂位置与稳定杆垂向交变载荷密切相关,路谱采集应重点关注连杆轴向受力和稳定杆扭转相对位移。

收稿日期:2023-02-09;**修订日期:**2023-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52072157)

作者简介:潘公宇(1965—),男,江苏镇江人,江苏大学教授,博士,主要从事车辆系统动力学、振动与噪声控制的研究,
E-mail:774513912@qq.com。

引用本文:潘公宇,徐锐,杨晓峰. 基于整车路面谱的副车架开裂台架试验及仿真[J]. 郑州大学学报(工学版),2024,45(1):29-33,63. (PAN G Y, XU R, YANG X F. Sub-frame crack rig testing and simulation analysis based on full-vehicle rough road spectrum[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024,45(1):29-33,63.)



图 1 副车架与稳定杆结构

Figure 1 Sub-frame and stabilizer bar structure

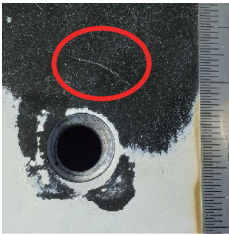


图 2 开裂位置局部放大图

Figure 2 Crack location detail view profile

1.1 应变片贴片及台架标定

稳定杆连杆上部连接减振器下筒,下部连接稳定杆端部,其运动形式主要为沿悬架垂直方向的上下运动,其功用主要是将扭转力传递到悬架从而抑制侧倾,连杆力的标定如图 3(a)所示。当车辆行驶过程中左右轮心垂向位移发生差异时,稳定杆两侧端头产生相对位移差,稳定杆绕副车架衬套点连线扭转,抑制悬架跳动。稳定杆端头的扭转相对位移也是表征稳定杆系统受力及运动的关键载荷量。稳定杆扭转相对位移标定如图 3(b)所示。

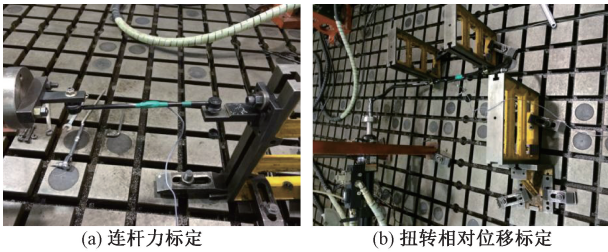
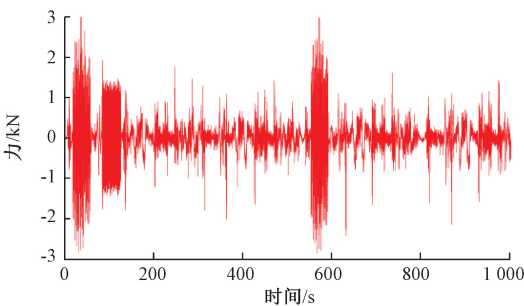


图 3 稳定杆标定

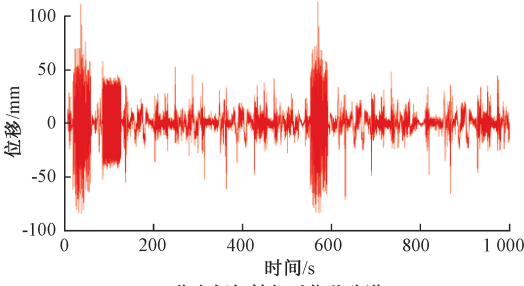
Figure 3 Stabilizer bar calibration

1.2 试验场路谱采集

将标定后的连杆和稳定杆装配到整车上,依据整车强化耐久规范,按照规定的车速、规定的耐久路面及相关的行驶路径完成一个循环强化耐久试验,并采集相关数据。为减少数据离散偏差,路谱采集过程中需要在指定车速下至少采集 3 圈没有毛刺、没有噪声干扰和温漂的有效数据以备后续台架试验和仿真使用。特征路面包括比利时路、扭曲路、搓板路、砂石路、沟渠路等等。采集到的连杆力和稳定杆扭转相对位移信号如图 4 所示。



(a) 稳定杆连杆力路谱



(b) 稳定杆扭转相对位移路谱

图 4 试验场路谱

Figure 4 Load spectrum on proving ground

1.3 试验台架搭建

副车架和稳定杆系统的台架装置如图 5 所示,将副车架与车身连接点螺栓固定(三角所示),连杆上端与液压缸缸头相连接,采用力或位移输入信号进行控制(箭头所示)。

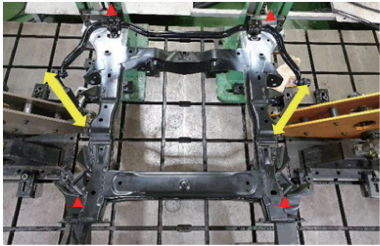


图 5 副车架稳定杆台架

Figure 5 Sub-frame and stabilizer bar test rig

以试验场采集的试验数据为基础,以连杆力和稳定杆扭转相对位移为期望信号,在台架上迭代反求液压缸激励,保证台架力的传递及响应同整车耐久路试一致。按照耐久规范进行台架试验至副车架与稳定杆支架连接处开裂。台架开裂位置如图 6 所示。

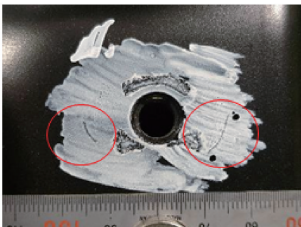


图 6 台架副车架开裂位置

Figure 6 Sub-frame crack location on test rig

从图 6 可看出,台架的失效位置和失效模式与整车强化耐久路试一致,物理台架较好地复现了整车耐久路试的开裂。

2 虚拟仿真模型及仿真结果

2.1 多体动力学模型建模

根据物理台架的约束边界及液压缸激励条件,在 Adams 中建好相对应的多体模型。副车架采用柔性体,稳定杆采用 Adams Beam 梁建模,稳定杆和副车架衬套连接,连杆与稳定杆采用球铰副连接^[3-4]。副车架与车身连接点用固定副连接,在连杆上端加位移,模拟液压缸的台架激励。多体动力学的虚拟台架如图 7 所示。

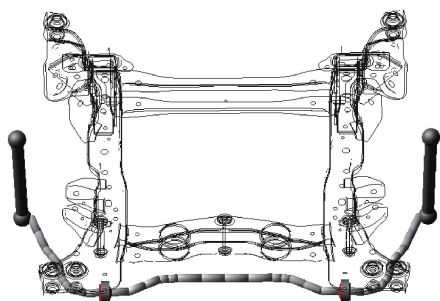


图 7 多体虚拟台架模型

Figure 7 MBS virtual test rig model

2.2 虚拟迭代的原理

虚拟迭代法^[5]在本质上是非线性系统的逆求解问题。首先在整车短路试验的基础上测取系统的响应信号(位移、力、速度或者加速度等),然后利用响应信号求解系统的外部驱动载荷(在本文中为求解的连杆端头位移)。虚拟迭代原理叙述如下。

(1)将多体动力学模型作为一个系统,输入白噪声信号 $u_0(s)$ 激励系统产生响应信号 $y_0(s)$,求得系统的传递函数,进而求出逆传递函数 $F^{-1}(s)$ 。

$$F(s) = \frac{u_0(s)}{y_0(s)}. \quad (1)$$

(2)以路试采集的信号作为目标信号 $y_d(s)$,根据逆传递函数 $F^{-1}(s)$ 计算初始驱动信号为

$$u_1(s) = F^{-1}(s)y_d(s). \quad (2)$$

(3)初始驱动信号激励多体动力学模型得到响应信号 $y_1(s)$ 。因为传递函数不能精确表征多体动力学模型,所以目标信号 $y_d(s)$ 与响应信号 $y_1(s)$ 之间存在一定的误差。

(4)用修正算法将逆传递函数 $F^{-1}(s)$ 固定,通过式(3)进行反复迭代,直到响应信号与目标信号之间误差满足精度要求,停止迭代,即

$$u_{k+1}(s) = u_k(s) + F^{-1}(s)[y_d(s) - y_k(s)]. \quad (3)$$

式中: $y_k(s)$ 为第 k 次迭代响应信号; $u_k(s)$ 为第 k 次驱动信号; k 为迭代次数。

2.3 虚拟迭代

将动力学模型输出成 Adams/Solver Dataset 可识别的 adm 文件,在 Femfat-LAB 软件中,输入选择连杆端头的位移驱动,输出选择连杆力和稳定杆扭转相对位移。以 0~50 Hz 的粉红噪声为激励,求解出虚拟台架系统输入和输出间的传递函数。

迭代过程中以试验场路谱的连杆力和稳定杆扭转相对位移为目标,通过不断修正连杆端头的位移输入进行虚拟迭代,直到迭代的仿真期望值满足目标及结果收敛,迭代终止。

2.4 疲劳仿真载荷结果分析

通过时域信号、频域 PSD、穿级计数及相对损伤的仿真和实测信号分析对稳定杆扭转相对位移、左右侧连杆力进行相关性评估。

比利时路由于行驶速度快、路面左右不对称度高、循环次数多,对稳定杆系统损伤贡献度占比为 60%~70%;同时比利时路激励频率带宽分布较广,为 0~40 Hz,迭代难度较大。故以比利时路为例重点做迭代说明。

图 8 为稳定杆扭转相对位移仿真值与测试值的对比。由图 8(a)可知,扭转相对位移在比利时路面幅值为 ± 60 mm,仿真相位和测试相位基本吻合但幅值略小。由图 8(b)的 PSD 谱可知,稳定杆扭转相对位移出现在比利时路的频带主要为 22 Hz 以下;2~6 Hz 时仿真的能量较测试稍低,可能是由于仿真稳定杆扭转刚度相对于实际有偏差,稳定杆衬套只考虑静刚度,未考虑衬套动刚度、损失角及阻尼所导致;但在 6~22 Hz 时比利时路主要频率段仿真和测试的 PSD 能量分布基本重合。穿级计数主要是从疲劳统计角度评估载荷,由图 8(c)可知,位移仿真值和测试值在 0~40 mm 的幅值和重复数分布几乎重合,但在 40~60 mm 的仿真值相对于测试值偏小,可能由于 Adams 生成的 Beam 梁稳定杆比实际的稳定杆扭转刚度稍大所导致。但由表 1 可知,稳定杆扭转相对位移的相对损伤为 0.86,满足相对损伤目标 0.5~2.0 的要求,仿真结果可接受^[6]。

图 9 为稳定杆左侧连杆力仿真与测试的对比。由图 9(a)可知,连杆力的幅值在 ± 2.3 kN,仿真通道的幅值和相位与测试几乎重合。图 9(b)的 PSD 对比表明,连杆的受力在比利时路上的频率分布在 22 Hz 以内,主要频率段仿真和测试的 PSD 能量分布基本重合。图 9(c)为考虑连杆力穿级计数的对比结果,整个范围内幅值和重复数重合度良好。由

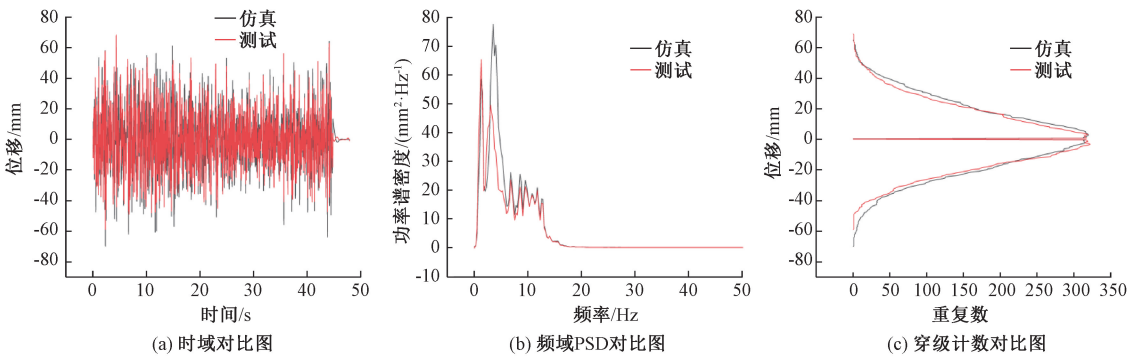


图 8 稳定杆扭转相对位移对比

Figure 8 Arb relative displacement comparison

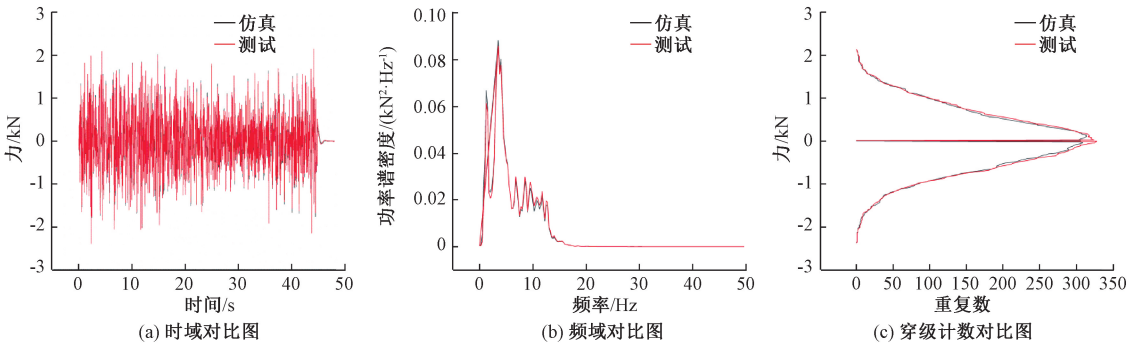


图 9 左侧连杆力对比

Figure 9 Left droplink force comparison

表 1 可知,相对损伤均在 1 附近,仿真荷载和测试载荷对比精度非常高。右侧连杆力的仿真和测试对比与左侧基本一致,故不再说明。

表 1 通道相对损伤对比

Table 1 Relative damage comparison of channels	
对比通道	相对损伤
稳定杆扭转相对位移	0.86
左侧稳定杆连杆力	1.04
右侧稳定杆连杆力	0.95

通过比利时路 3 个关键通道的对比分析,表明仿真和测试有着良好的相关性,多体虚拟台架的载荷传递和运动状态与物理台架基本一致,风险位置载荷精度较高,可满足后续有限元仿真需求。其他特征路面迭代仿真方法与比利时路面类似。将各路面最后一步迭代仿真结果作为疲劳载荷输出,方便后续副车架的疲劳有限元分析计算。

3 疲劳寿命分析及风险位置改进设计

3.1 疲劳寿命有限元分析

在 HyperMesh 中对前副车架进行网格划分及模型处理,赋予材料属性,在 Nastran 中计算单位应力,结合多体仿真的连接点载荷,应用准静态法进行副车架的疲劳分析计算^[7-9]。仿真得出的路试开裂位

置的损伤寿命如图 10 所示。

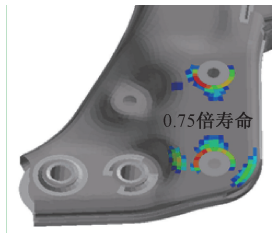


图 10 开裂位置疲劳损伤图

Figure 10 Fatigue damage of crack location

关于风险位置在整车耐久路试、物理台架试验、虚拟仿真下的疲劳寿命对比如表 2 所示(寿命偏差比以整车强化耐久路试为基准)。

表 2 风险位置的疲劳寿命对比

Table 2 Crack location fatigue damage comparison		
方式	失效时间	偏差比/%
整车强化耐久路试	0.80 倍寿命	0
物理台架试验	0.82 倍寿命	2.5
虚拟仿真	0.75 倍寿命	6.25

3.2 风险位置优化改进

风险位置的仿真疲劳寿命和整车耐久路试及物理台架试验较吻合,因此可以基于虚拟载荷进行副车架风险位置优化。改进稳定杆与副车架连接处的安装支架结构,优化后的风险位置疲劳仿真失效时

间达到 1.5 倍寿命,满足耐久目标,后期优化结构的副车架顺利通过了整车强化耐久路试。本文风险位置优化改进流程图如图 11 所示。

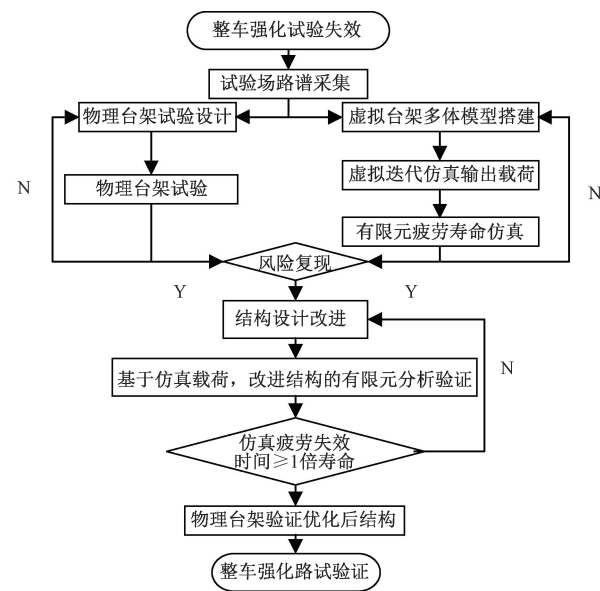


图 11 风险位置改进流程图

Figure 11 Crack location optimize process

4 结论

(1)本文针对整车强化耐久路试风险位置展开研究,通过物理台架试验及虚拟台架仿真,建立起了整车耐久路试、物理台架试验、虚拟仿真三者之间较好的相关性。采用虚拟迭代的方法,虚拟台架相关的测试通道仿真精度高,虚拟疲劳载荷输入与整车耐久路试荷载和物理台架试验荷载的一致性较好,疲劳有限元仿真有效地复现了开裂位置及寿命里程,可以为相关车型耐久问题的解决提供思路。

(2)针对整车耐久路试出现的风险,基于路谱采集相关试验数据,借助虚拟迭代的方法,极大地解决了仿真模型与实际物理系统的偏差问题,可以获得风险区域较高精度的耐久载荷,保证疲劳仿真分析结果的准确性和可信性,也可用于借鉴处理其他系统的耐久问题。

参考文献:

[1] 周德生,吴奕东,胡浩炬,等. 后副车架台架耐久开裂分析及结构优化[J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1510-1514.
ZHOU D S, WU Y D, HU H J, et al. Analysis of durable cracking and structure optimization of rear sub-frame[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(6): 1510-1514.

[2] 孙成智,段向雷,翁洋,等. 基于 3D 数字路面的整车

耐久性能评价方法研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(10): 1211-1216.

SUN C Z, DUAN X L, WENG Y, et al. A study on the evaluation method of vehicle durability performance based on 3D digital road[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(10): 1211-1216.

[3] 陆森林,许静超. 基于虚拟样机技术的汽车前悬架优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 124-128.

LU S L, XU J C. Optimization of front suspension of vehicle based on virtual-pototype-technology[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(2): 124-128.

[4] 王冬成,潘筱. 后横向稳定杆对汽车不足转向性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(6): 68-70.

WANG D C, PAN X. Influence of rear anti-roll bar on vehicle under-steer performance[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(6): 68-70.

[5] 付春雨,曾超,刘宏杰,等. 基于虚拟迭代的装载机后处理支架载荷谱获取方法[J]. 现代制造工程, 2021(1): 17-21.

FU C Y, ZENG C, LIU H J, et al. Obtaining load spectrum method of loader's post-processing bracket based on virtual iteration[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(1): 17-21.

[6] 吴泽勋,张林波,孟凡亮,等. 基于虚拟迭代的轿车车身耐久性虚拟试验方法[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(6): 37-40.

WU Z X, ZHANG L B, MENG F L, et al. Virtual test method of car body durability based on virtual iteration[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(6): 37-40.

[7] 惠延波,王宏晓,冯兰芳,等. 基于 MSC. fatigue 的某轻型客车车架疲劳寿命分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(1): 87-90.

HUI Y B, WANG H X, FENG L F, et al. Fatigue analysis for light-bus frame based on MSC. fatigue[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(1): 87-90.

[8] 许期英,钟自锋. 汽车横向稳定杆疲劳寿命分析及其优化设计[J]. 机械强度, 2019, 41(5): 1228-1232.

XU Q Y, ZHONG Z F. Fatigue life analysis and optimization design of vehicle horizontal stabilizer bar[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(5): 1228-1232.

[9] 朱剑峰,林逸,张涛,等. 基于虚拟台架疲劳分析的副车架结构改进设计[J]. 汽车工程, 2014, 36(5): 630-634.

ZHU J F, LIN Y, ZHANG T, et al. Modification design of subframe structure based on virtual rig fatigue analysis[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(5): 630-634.

Research and Implementation of Product Traceability System Based on Dual Blockchain

HAN Yanyan^{1,2}, WEI Wanqi¹, DOU Kaili³, ZHANG Qi¹

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China; 2. College of Information Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. Department of Cyberspace Security, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: Due to the limited block information storage capacity, the existing blockchain traceability system mostly adopted the combination of blockchain and cloud storage, which could not fundamentally solve the problem of blockchain traceability information storage and data leakage. The dual blockchain mode was constructed, the query chain was used to complete the uploading of traceability information and to realize the basic functions of the traceability system. The storage chain was combined with the interplanetary file system to ensure data integrity and security. On this basis, the improved capacity proof consensus algorithm was used to ensure the underlying security and meet the application requirements of blockchain traceability system while reducing energy consumption. The test showed that the average upload speed of the system could reach 80.66 M/s, and the average download speed could reach 90.75 M/s, with good upload and download performance. Blockchain transactions per second reached 125.88, and the carrying capacity of a single transaction could meet the demand for block transactions of the traceability system.

Keywords: dual blockchain; capacity proof; interplanetary file system; traceability system; reliable data storage

(上接第 33 页)

Sub-frame Crack Rig Testing and Simulation Analysis Based on Full-vehicle Rough Road Spectrum

PAN Gongyu¹, XU Rui^{1,2}, YANG Xiaofeng¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Evergrande New Energy Automotive R&D Institute Global Headquarters, Shanghai 201620, China)

Abstract: The study was conducted to examine the durability issue occurred in front stabilizer bar bracket connected to sub-frame in full vehicle testing. Firstly, stabilizer bar system was plastered with strain gauges and calibrated, and drop link force and stabilizer bar twist displacement acquired on proving ground, sub-frame with stabilizer bar system physical test rig was designed and built, and rig tests in accordance with durability specifications were conducted. The test results showed that built physical test rig could greatly reappear crack location in full vehicle testing, the fatigue life of the physical bench had a deviation of 2.5% compared to full vehicle testing. Based on this, a stabilizer bar and sub-frame multi-body virtual model was built with the same constraint boundary and the same loading method of the physical test rig. Then CAE fatigue simulation was used through quasi-static finite element fatigue life analysis method to reappear related area risk. The simulation results showed that phase and amplitude had a good coincidence in time domain, the PSD spectrum also had a good accuracy in frequency domain, the relative damage was almost closed to 1 with the comparison between the simulation and test in droplink force and stabilizer bar relative displacement. The deviation between the simulated fatigue life at the relevant risk position and the test life of the full vehicle was 6.25%. A higher accuracy risk position load was obtained, and the reappearance of durability risk position was achieved. Finally, based on simulation fatigue load, the optimization risk structure was evaluated. Optimized proposal eventually passed the test rig and full vehicle testing successfully.

Keywords: rig test; durability; virtual iteration; fatigue simulation; correlation