

某 SUV 排气系统吊挂车身侧结构开裂问题研究*

RESEARCH ON THE CRACKING OF THE HANGER BODY

SIDE STRUCTURE OF AN SUV EXHAUST SYSTEM

赖余东**¹ 门群森² 孙士平***² 邱 星¹

(1. 江铃汽车股份有限公司 产品开发中心, 南昌 330052)

(2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

LAI YuDong¹ MEN QunSen² SUN ShiPing² QIU Xing¹

(1. Center of Product Development, Jiangling Motors Co., Ltd., Nanchang 330052, China)

(2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

摘要 针对某 SUV 排气系统吊挂车身侧结构开裂问题,采用整体分析与局部分析相结合的计算流程开展了吊挂车身侧结构强度校核研究。首先,基于 Hyper Works 软件建立排气系统有限元模型,以实车道路频域加速度路谱为激励源进行整体频响分析,获得车身侧吊挂点的动态响应载荷;其次,建立车身侧局部结构的有限元模型,完成动态载荷峰值作用下吊挂点车身侧结构响应分析。分析结果表明,车身侧结构最大应力达到材料屈服强度的 125.3%,是导致结构开裂的主要原因,结构高应力分布与实车结构开裂脱落区域吻合,说明所采取的计算流程是可行的。根据分析,改进了吊挂结构,仿真结果显示改进方案的最大应力仅为原方案的 9.1%,满足了强度要求,并顺利通过整车道路耐久试验。

关键词 整体-局部计算流程 排气吊挂 频率响应 强度校核

中图分类号 U464.134

Abstract The calculation flow of combining the global analysis with the local analysis was proposed to carry out the structural strength checking research, in order to solve the problem of hanger body side structure cracking of a SUV exhaust system. Firstly, the finite element model of exhaust system was established by Hyper Works software, and the road acceleration spectrum of real vehicle in frequency domain was used as the excitation source of exhaust system. The global frequency response analysis was implemented to obtain the dynamic response load of suspension point. Secondly, the finite element model of the local body side structure was built to analyze the structural response under dynamic load peak. The results show that the maximum stress of the body side structure reaches 125.3% of the material yield strength, which is the main reason for the structure cracking. The high stress distribution of the structure is consistent with the actual vehicle structure cracking area, which demonstrates that the calculation flow is feasible. An improved scheme of hanging structure is put forward. The simulation results show that the maximum stress of the improved scheme is only 9.1% of the original scheme, which meets the strength requirements and successfully passes the vehicle road durability test.

Key words Global-local calculation flow; Exhaust hanger; Frequency response; Strength check

Corresponding author: SUN ShiPing, E-mail: shipingsun@163.com, Tel/Fax: + 86-791-83863028

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11862015), and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20192BAB206027).

Manuscript received 20210225, in revised form 20210417.

引言

排气系统一端连接发动机,一端延伸至车尾,纵贯

整个车身底部,中间布置一定数量的吊挂点,采用吊挂系统连接在车身上。吊挂系统由排气管侧吊钩、车身侧吊钩和橡胶吊耳(衬套)组成,两个吊钩分别与排气

* 20210225 收到初稿, 20210417 收到修改稿。国家自然科学基金项目(11862015), 江西省自然科学基金项目(20192BAB206027) 资助。

** 赖余东, 男, 1986 年 1 月生, 江西赣州人, 汉族, 江铃汽车股份有限公司产品开发中心工程师, 研究方向为汽车结构疲劳强度分析。

*** 孙士平(通信作者), 男, 1972 年 11 月生, 湖北潜江人, 汉族, 南昌航空大学航空制造工程学院教授, 博士, 研究方向为材料与结构的拓扑优化设计。

管和车身底板连接,利用橡胶吊耳实现隔振减振。车辆行驶过程中,受路面和发动机的激励作用,排气系统会出现剧烈抖动,抖动产生的动态载荷沿排气管侧吊钩-吊耳衬套-车身侧吊钩的路线传递到车身,由车身侧钣金结构承受^[1],容易造成结构开裂^[2],因此,必须对与吊钩连接的车身侧结构强度进行校核,避免出现失效问题。

然而,目前对排气系统的研究主要集中在吊挂点位置优化以改进整车噪声振动平顺性(NVH)性能^[3-9],少数研究分析了排气系统悬挂结构的力学性能及吊钩强度^[10-12],而对与吊钩连接的车身侧结构强度分析则鲜有报道。为此,针对某 SUV 车型排气系统吊钩车身侧结构开裂故障问题,本文结合 CAE 仿真技术^{[13][14]} 919-912,提出一种基于实车路谱的吊钩车身侧结构强度校核流程,利用 Hyper Works 软件建立排气系统有限元模型,结合排气系统整体频响分析与车身侧局部结构静力分析有效还原开裂故障现象,探讨了开裂机理并提出改进方案,通过仿真分析和道路耐久验证,改进方案的可行性、有效性。

1 问题描述

1.1 故障现象及分析

某 SUV 车型在耐久路试过程中出现排气系统吊钩车身侧钣金结构开裂故障,如图 1 所示。图 1 中圆杆形吊钩通过二保焊与“几”字型支架中部连接,支架两端再通过四个焊点与车身后地板加强梁的下表面连接,开裂发生在后地板加强梁处。图 1 显示“几”字型支架的各焊点焊缝完好,后地板加强梁钣金结构呈撕裂状,并完全脱离车身。根据开裂脱落现象,初步判断是焊点边缘材料首先出现裂纹,在排气系统抖动产生的动态载荷作用下裂纹不断扩展,直至完全撕裂,因此,需要对吊钩车身侧结构进行强度校核。



图 1 吊挂点车身侧钣金开裂故障图

Fig.1 Hanging point body side sheet metal cracking fault diagram

获取准确的吊钩载荷是进行吊挂车身侧结构强度校核的关键。考虑到吊钩承受的动态载荷来自排气系统的抖动,而该抖动源自路面和发动机的激励,因此,本文拟采用一种排气系统整体频响分析车身侧结构局部强度,分析两步流程实现对车身侧结构的强度校核,

具体流程如图 2 所示。首先,通过采集排气系统吊挂车身侧的实车道路耐久加速度路谱,以此为激励源进行排气系统整体频响分析,获得车身侧吊钩的动态响应载荷;其次,以动态响应载荷峰值作为载荷工况,对开裂的车身侧结构进行强度分析,完成设计方案改进和验证。

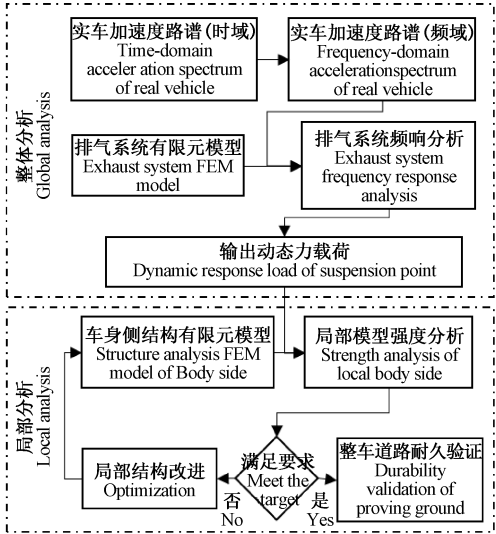


图 2 整体分析-局部分析强度校核流程

Fig.2 Strength checking flow combining global analysis with local analysis

1.2 实车路谱分析

该 SUV 车型的排气系统共布置了 5 个吊挂点,如图 3 所示,开裂故障出现在吊挂点 5 的车身侧。通过在每个吊钩车身侧布置一个三向加速度传感器,按照整车道路耐久试验规范,采集试验场不同行车状态、不同路面下吊挂车身侧的时域加速度路谱数据。在所有路面中,以共振路、搓板路、比利时路为振动特性显著路面,车辆按一定车速通过时会剧烈颠簸,是支架类零件的恶劣工况路面,因此,本文选取这三种路面的加速度路谱作为激励源进行排气系统的响应分析,忽略其他情况的影响。

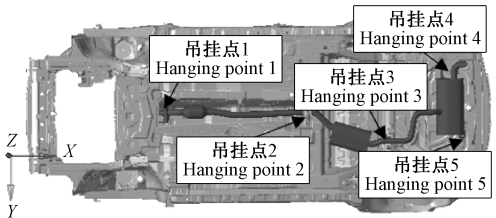


图 3 排气系统吊挂点分布示意图

Fig.3 Distribution diagram of hanging points of exhaust system

为了提高计算效率,本文采用模态频率响应分析法对排气系统进行响应分析^[15]。因此,需要将采集的时域加速度路谱数据通过傅里叶变换转为频域加速度路谱数据。以吊挂点 5 的采集路谱数据为例,如图 4 所示,图中实线圈住部分为振动路面路谱,通过 Hyper

Graph 软件处理获得的三种路面的频域加速度路谱如图 5~图 7 所示。对比图 5~图 7 中三种路面的频域加速度曲线可看到,三种路面的路谱激励集中在 0 Hz~80 Hz 范围内,超过 80 Hz 的激励波动都非常小;三种路面的路谱均以 Z 向振动加速度峰值为最大,且最大值均位于 13 Hz 附近,而 X 和 Y 向加速度峰值显著小于 Z 向;比较三种路面的 Z 向振动加速度峰值,以振动路面的峰值最大(0.98g),搓板路面次之(0.84g),比利时路面的峰值最小(0.55g)。综上,本文选取振动路面的加速度路谱数据作为排气系统的激励载荷。

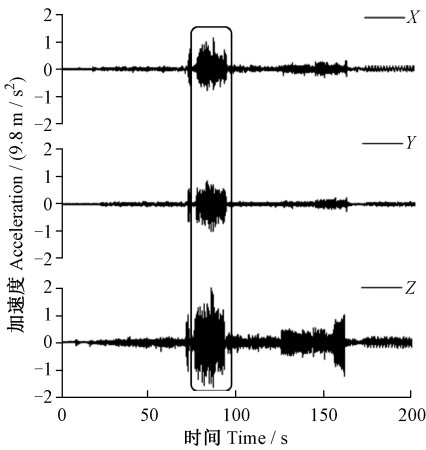


图 4 吊挂点 5 的时域加速度路谱

Fig.4 Time domain acceleration path spectrum of hanging point 5

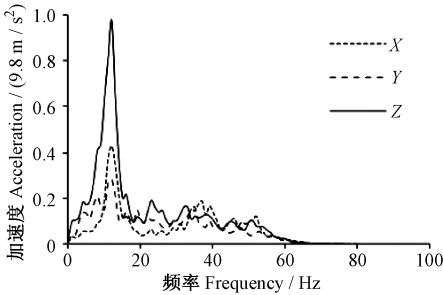


图 5 吊挂点 5 的振动路面频率-加速度曲线

Fig.5 Frequency-acceleration curve of vibrating pavement of hanging point 5

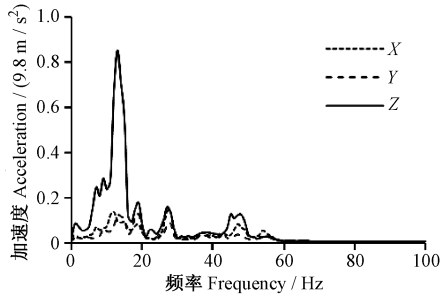


图 6 吊挂点 5 的搓板路面频率-加速度曲线

Fig.6 Frequency-acceleration curve of washboard pavement of hanging point 5

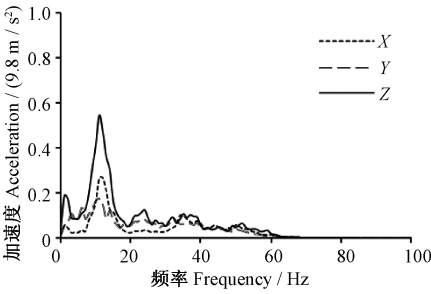


图 7 吊挂点 5 的比利时路面频率-加速度曲线

Fig.7 Frequency-acceleration curve of Belgian road surface of hanging point 5

2 吊挂车身侧结构分析

2.1 排气系统的有限元模型

排气系统结构的组成复杂,表 1 列出了各零部件的材料类型,在对其建立有限元模型时,要充分考虑各部件的质量分布和刚度特性^{[14]919-912}。应用 Hyper Mesh 进行排气系统整体网格划分结果如图 8 所示,单元尺寸 5 mm,共计 83 072 个单元。其中三元催化器、消声器、排气管等薄壁类部件采用三维壳单元对其进行离散;吊钩、法兰盘零件采用三维六面体单元进行离散;对于波纹管、吊钩衬套等弹性零件,采用零长度弹簧单元模拟,并赋予其各向实测刚度值。

表 1 排气系统零部件材料类型及性能参数

Tab.1 Material types and performance parameters of exhaust system components

部件 Part name	牌号 Trademark	弹性模量 Elastic modulus E/MPa	泊松比 Poisson's ratio μ	密度 Density $\rho/(kg/m^3)$
排气管、催化器、消声器 Exhaust tube、catalyst、antisqueak	SUH409L	208 000	0.28	7 750
连接法兰 Connection flange	Q235	210 000	0.3	7 850
吊钩 Hanger	20#	210 000	0.3	7 850

要准确分析排气系统吊挂车身侧的响应,需要确定合适的有限元模型的边界条件和激励载荷工况。本文将车身、发动机视为刚体,等同于大地,将模拟波纹管的弹簧单元一端连接排气管,另一端连接大地,代表延伸至发动机一侧的排气部件;将模拟吊钩衬套的弹簧单元一端连接排气管侧,另一端连接大地,代表车身侧吊钩。以各吊挂点弹簧单元的大地端为激励施加点,波纹管弹簧单元连接大地端为全约束边界,在 0 Hz~100 Hz 频率范围内进行排气系统频响分析。

2.2 排气系统整体频响分析

采用 Optistruct 求解器进行排气系统的模态频率

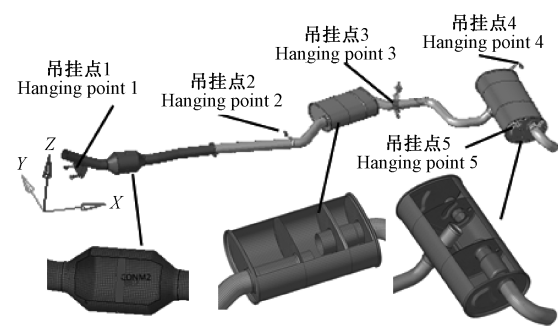


图 8 排气系统有限元模型
Fig.8 Finite element model of exhaust system

响应分析。将各吊挂点振动路面 X 、 Y 、 Z 三向频率-加速度曲线作为激励导入对应的吊挂激励施加点,通过模态频响分析获取各激励施加点的三向频率-力曲线,即车身侧吊钩随频率变化的动态力曲线。以吊挂点 5 为例,其频率-力曲线如图 9 所示。图 9 中, X 、 Y 、 Z 三个方向力的峰值分别为 17 N、38 N 和 122 N,其中 Z 向力的峰值最大, Y 向和 Z 向峰值力均出现在 13 Hz 附近,而 X 向峰值力出现在 7 Hz 附近。由于在 7 Hz 附近的 Y 向力和 Z 向力均小于 X 向力,此频率点的三向合力非常小,不足以导致钣金结构开裂。因此,选取出现 Z 向峰值力频率点(13 Hz)处的 X 、 Y 、 Z 三向力,即 X 向 7 N, Y 向 28 N, Z 向 122 N,作为吊挂点 5 车身侧结构强度校核的最大工况载荷。

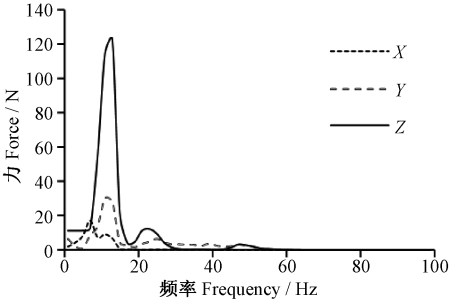


图 9 吊挂点 5 的车身侧吊钩频率-力曲线
Fig.9 Frequency-force curve of body side hook of hanging point 5

2.3 车身侧局部结构强度分析

以后地板加强梁开裂点为中心,截取 300 mm×300 mm×300 mm 区域的车身结构,建立车身侧局部结构的详细有限元模型,如图 10 所示。其中钣金件用三维壳单元离散、吊钩用六面体单元离散、钣金件焊点用 RBE3-HEX-RBE3 方式模拟、吊钩与“几”字型支架的二保焊用 RBE2 单元模拟。图 10 中加强梁厚度为 0.7 mm,材料为 B280VK,其屈服强度为 280 MPa;“几”字型支架材料厚 2 mm,材料为 B210P1;后地板厚度为 0.7 mm,材料为 DC06;后围板厚度为 0.7 mm,材料为 DC04,吊钩与排气侧吊钩材料相同,为 20#钢。

车身侧钣金结构的截断位置按全约束边界处理,用 RBE2 单元模拟橡胶衬套,其从节点模拟吊钩与衬

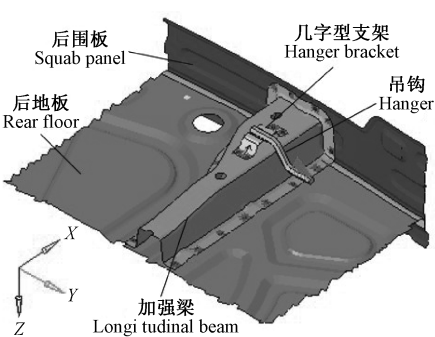


图 10 吊挂点 5 的车身侧局部有限元模型
Fig.10 Finite element model of local body side structure of hanging point 5

套的接触区域,而主节点用作工况载荷的加载点。将图 9 中 13 Hz 频率点的三向力施加在加载点上,如图 11 所示,其合力大小为 125 N。采用 Optistruct 求解器对该模型开展线性静强度分析,得到加强梁的应力分布如图 12 所示。

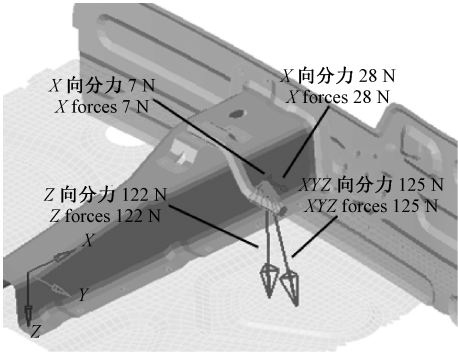


图 11 车身侧吊钩激励载荷示意图
Fig.11 Schematic diagram of body side hook excitation load

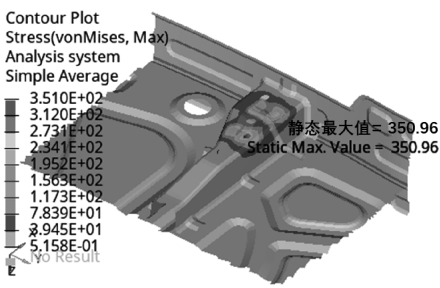


图 12 车身侧结构应力云图
Fig.12 Stress nephogram of body side structure

2.4 结果分析及讨论

从图 12 看到,加强梁的高应力区域集中分布在四个焊点周围,这与实车开裂区域一致,其中最大应力为 350.96 MPa,高于加强梁材料的屈服强度 280 MPa,而其他三个焊点区域的应力要低于材料屈服强度。虽然故障发现时加强梁与支架连接部位已经完全撕裂脱落,但从仿真结果可以推断:在路面周期动态载荷作用下,最大应力处的材料首先失效出现裂纹,承载能力下降,其他焊点区域被迫承担更多载荷而应力上升,随着裂缝增长,三个焊点区域最大应力持续升高并陆续超

出材料屈服强度,在周期动态载荷作用下逐渐开裂,最终加强梁与支架连接部位完全断裂脱落。

3 方案改进及验证

3.1 吊钩结构设计改进与仿真分析

分析图 10 中吊钩和加强梁的位置关系,可以看到吊钩通过“几”字型支架固定在加强梁上,类似悬臂梁,这种结构会以吊钩长度为力臂将载荷放大并作用于加强梁下表面,导致加强梁应力值超出材料屈服强度,经过一定次数的载荷循环作用后必然会出现失效。因此,产生开裂现象的根本原因是车身侧吊钩过长,需要重新设计吊钩结构。从缩短力臂出发,改进的吊钩结构如图 13 所示,将吊钩与加强梁的连接点从加强梁下表面移到加强梁侧面,通过缩短吊钩到车身侧的距离减小作用在加强梁上的力矩,同时增加一根辅助圆杆来增强吊钩 X 向稳定性。吊钩和加强梁等通过焊接连接在一起。

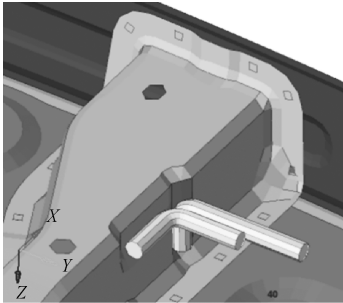


图 13 吊钩改进方案示意图

Fig.13 Schematic diagram of hook improvement scheme

采取与图 10 模型相同的边界条件及载荷工况对改进方案进行强度分析,获得改进方案加强梁应力分布如图 14 所示。图 14 中加强梁最大应力仅为 31.78 MPa,远小于材料屈服强度 280 MPa,相比原方案最大应力下降了 90.94%,改进效果显著。

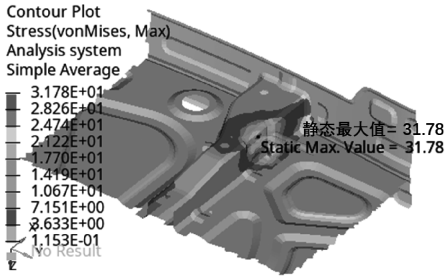


图 14 改进方案的应力分布云图

Fig.14 Stress distribution nephogram of improved scheme

3.2 整车道路耐久验证

为验证改进方案的有效性和可靠性,将改进方案搭载实车进行整车道路耐久验证。按照整车道路耐久规范,共计完成耐久里程 50 000 km。试验结束后,检查该吊挂位置,如图 15 所示,并未发现开裂现象,顺利

通过整车道路耐久验证。



图 15 改进方案耐久状态图

Fig.15 Durability state chart of improvement scheme

4 结论

本文提出了某 SUV 排气系统吊挂车身侧结构整体频响分析与局部强度分析相结合的强度校核方法,建立了排气系统的有限元模型和车身侧局部结构的有限元模型,通过整体的模态频率响应分析和局部模型的静力分析准确还原了车身侧结构开裂现象,解释了产生开裂的原因,并对吊钩结构进行改进,改进的吊钩结构最大应力比原方案下降约 91%,通过了耐久试验,为分析车身侧结构失效和优化吊钩结构提供了借鉴。

参考文献 (References)

[1] 庞 剑, 谌 刚, 何 华. 汽车噪声与振动: 理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 258-260.
PANG Jian, CHEN Gang, HE Hua. Automotive noise and vibration: Principle and application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006 : 258-260 (In Chinese).
[2] 管加团, 陈允成, 徐倩倩, 等. 某非承载式车身体板纵梁开裂分析研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(增刊 1): 187-191.
GUAN JianTuan, CHEN YunCheng, XU QianQian, et al. Cracking analysis and research for floor longitudinal beam of a non-loaded vehicle body [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(Suppl1): 187-191 (In Chinese).
[3] 李松波, 袁 明, 管西强, 等. 轿车排气系统一维数值模型简化及模态实验验证[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 731-735.
LI SongBo, YUAN Ming, GUAN XiQiang, et al. One dimension numerical model simplification of exhaust system and validation by modal experiment [J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31 (5): 731-735 (In Chinese).
[4] 徐维维, 马心坦, 朱 凯. 某乘用车排气系统悬挂位置的确定[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40 (5): 169-205.
XU WeiWei, MA XinTan, ZHU Kai. Determination of suspension position of the exhaust system of a passenger car [J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40 (5): 169-205 (In Chinese).
[5] 张 强, 毛虎平, 高鹏飞, 等. 某乘用车排气系统吊钩位置优化[J]. 机械设计与制造, 2018 (增刊 1): 110-113.

ZHANG Qiang, MAO HuPing, GAO PengFei, et al. The optimization of hook position of vehicle exhaust system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018 (Suppl1): 110-113 (In Chinese).

[6] 黄泽好, 郑风云, 姜广志, 等. 汽车排气系统悬挂点位置的优化改进[J]. 中国机械工程, 2016, 27(15): 2107-2111.

HUANG ZeHao, ZHENG FengYun, JIANG GuangZhi, et al. Hanger point location optimization to improve automobile exhaust system[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(15): 2107-2111 (In Chinese).

[7] 郭年程, 王新龙, 卜绍先, 等. 排气系统振动对牵引车舒适性的影响分析[J]. 汽车技术, 2016 (8): 35-38.

GUO NianCheng, WANG XinLong, BU ShaoXian, et al. Impact analysis of exhaust system vibration on tractor ride comfort [J]. Automobile Technology, 2016(8): 35-38 (In Chinese).

[8] 王 军, 邓兆祥. 基于层次分析法的排气系统悬挂点位置优化[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25): 149-156.

WANG Jun, DENG ZhaoXiang. Optimization of exhaust hangers' location layout by analytic hierarchy process (ahp) [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (25): 149-156 (In Chinese).

[9] 雷 刚, 胡 鹏, 刘圣坤. 汽车排气系统模态分析及挂钩位置优化[J]. 内燃机工程, 2014, 35(2): 102-106.

LEI Gang, HU Peng, LIU ShengKun. Automotive exhaust system modal analysis and hanger position optimization [J]. Journal of Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35 (2): 102-106 (In Chinese).

[10] 祁 祺, 刘昊天, 吴晓建, 等. FSC 赛车排气系统疲劳强度分析及优化[J]. 机械强度, 2020, 42(6): 1480-1488.

QI Qi, LIU HaoTian, WU XiaoJian, et al. Fatigue strength analysis and optimization of fsc racing exhaust system [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(6): 1480-1488 (In Chinese).

[11] 靳 龙, 曾 昊, 李玉奇. 某车型排气系统挂钩特性分析与研究[J]. 机械设计与制造, 2019(11): 79-82.

JIN Long, ZENG Hao, LI YuQi. Analysis and research on the characteristics of a vehicle exhaust system hook [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(11): 79-82 (In Chinese).

[12] 上官文斌, 黄 志, 贺良勇, 等. 汽车排气系统吊耳动刚度优化方法的研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 100-102.

SHANGGUAN WenBin, HUANG Zhi, HE LiangYong, et al. Modeling and optimization method of dynamic stiffness for automotive exhaust system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 100-102 (In Chinese).

[13] 侯献军, 郑 灏, 刘志恩, 等. 汽车排气系统局部疲劳耐久性试验仿真分析[J]. 汽车技术, 2011(3): 41-45.

HOU XianJun, ZHENG Hao, LIU ZhiEn, et al. Simulation and analysis of local fatigue durability test on vehicle exhaust system[J]. Automobile Technology, 2011 (3): 41-45 (In Chinese).

[14] 郭志全, 徐燕申, 杨江天. 基于 FEM 的新型运煤敞车的结构模态分析[J]. 机械强度, 2006, 28(6): 927-930.

GUO ZhiQuan, XU YanShen, YANG JiangTian. Modal analysis based on fem of open boxcar[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(6): 919-922 (In Chinese).

[15] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 33-35.

FU ZhiFan, HUA HongXing. The theory and application of modal analysis[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000: 33-35 (In Chinese).