

碳罐工作引起的整车怠速间歇性抖动分析与优化

史晓宁, 陈寒霜, 田子龙, 任超

(广州汽车集团股份有限公司, 广州 511434)

摘要:某车型在研发过程中存在整车怠速间歇性抖动现象,严重影响车辆舒适性。通过对抖动特征、碳罐电磁阀工作频率、发动机缸压、进气压力、动力总成刚体模态等参数进行测试与分析,明确了问题的真正原因,并提出了改进方案。优化后,整车怠速间歇性抖动现象得到明显改善。

关键词:怠速间歇性抖动;碳罐电磁阀工作频率;动力总成刚体模态

中图分类号:U463.6;U467.1 文献标志码:A DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.04.009

Analysis and Optimization of Vehicle Idle Intermittent Shake Caused by Carbon of Canister Working

SHI Xiaoning, CHEN Hanshuang, TIAN Zilong, REN Chao

(Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract: There exists the phenomenon of intermittent vehicle idle shake during vehicle development, which seriously affects driving comfort. Through testing and analyzing parameters such as vibration characteristics, purge solenoid operating frequency, engine cylinder pressure, intake pressure, and powertrain rigid body modes, the authors identify the root cause of the problem and propose corrective measures. After optimization, the intermittent shaking phenomenon improved markedly.

Key words: intermittent idle shake; purge solenoid operating frequency; powertrain rigid body mode

怠速属于常用工况,怠速工况下的整车座椅间歇性抖动极易被用户感知,引起用户不适。因此,找出怠速工况座椅间歇性抖动的真正原因,提出有可行性的解决方案,对于提高车辆舒适性具有重要意义。

文献[1]通过调整气门重叠角和点火提前角,提高了发动机怠速燃烧稳定性,从而改善了座椅抖动;文献[2-4]基于悬置优化设计、控制发动机扭矩波动改善整车怠速抖动;文献[5-6]通过调整发动机二次喷射截止时刻,有效提高了发动机起燃阶段的燃烧稳定性,从而降低发动机起燃阶段怠速工况座椅抖动水平。

上述研究多从发动机点火、喷油、扭矩波动等角度解决怠速间歇性抖动问题,但均未研究碳罐电磁阀工作频率对怠速间歇性抖动的影响。本文针对某车型怠速间歇性抖动问题,通过对碳罐电磁阀工作频

率、座椅导轨振动及发动机等测试数据进行时域和频域分析,并结合动力总成刚体模态测试,明确产生问题的真正原因是碳罐电磁阀工作频率与动力总成刚体模态的耦合,并提出怠速间歇性抖动控制方法。

1 问题现象

某MPV车型开发试验中,在怠速热机碳罐工作工况下,驾驶员座椅导轨存在周期为5s的间歇性抖动现象。当碳罐停止工作后,间歇性抖动现象消失,初步判断该抖动由碳罐工作引起。为进一步明确抖动产生机理,本文对怠速工况下的间歇性抖动进行测试。测试设备包括1套LMS SCADS数据采集系统、若干三向加速度计、1个破线针、4个KISTLER 6115CF缸压传感器和1台笔记本电脑。其中,三向加速度计分别布置在座椅导轨(如图1所示)、发动

收稿日期:2024-11-03。

第一作者:史晓宁(1989—),男,工程师,主要从事整车NVH性能研究工作。E-mail:shixiaoning95@gac.com.cn。

机悬置主动侧和被动侧;通过破线针采集碳罐电磁阀工作电压;通过整车 CAN 总线采集发动机转速、发动机扭矩、发动机进气压力、发动机水温等参数;通过缸压传感器采集发动机各缸缸压。



图1 座椅导轨振动测点

该试验在整车转毂半消声室进行,环境温度为 25℃。启动发动机,怠速运行,关闭空调、灯光和鼓风机等附件,待发动机水温达到 90℃后开始测试,测试时长为 60 s,同时进行主观评价。

对座椅导轨振动时域数据进行短时傅里叶变换,频率分辨率为 1 Hz,分析带宽为 5~20 Hz,得到时频图(图2)。综合时频图和主观感受可知,座椅主要振动频率为 11.8 Hz,振动量级为 0.05 m/s^2 ,振动周期为 5 s,发动机悬置主动侧和被动侧的振动特征与座椅导轨振动特征一致。

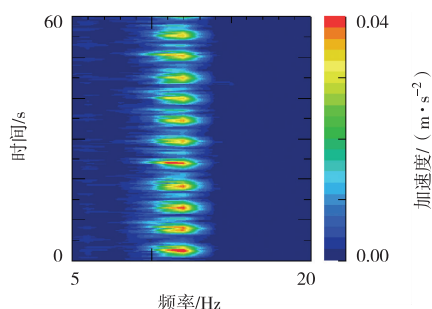


图2 座椅导轨振动时频图

为获取更精确的频率信息,将频率分辨率提高至 0.02 Hz,得到振动频谱(图3)。由图3可知,座椅导轨主要抖动共有 11.6 Hz、11.8 Hz、12 Hz 三个频率,相邻频率间隔均为 0.2 Hz,由此产生的 0.2 Hz 拍频与座椅抖动周期(5 s)一致,故初步判断这是导致座椅导轨振动存在间歇性抖动的原因之一。

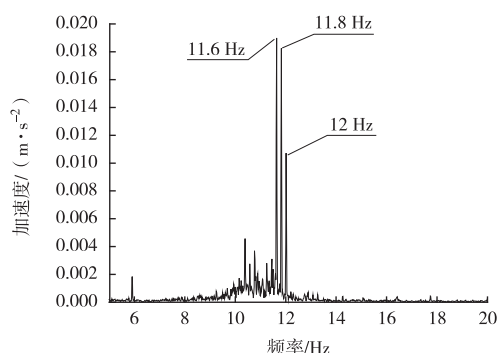


图3 座椅导轨振动频谱

根据四缸机发动机 1 阶点火频率计算公式 $f=n/60$ ^[7](式中 n 为发动机转速,该车怠速转速为 708 r/min)可知,发动机 1 阶点火频率为 11.8 Hz。当碳罐电磁阀停止工作后,主观评价座椅振动明显降低,故初步判断,11.6 Hz 和 12 Hz 振动主要由碳罐电磁阀工作引起。

2 机理分析

2.1 碳罐影响分析

汽油是一种易挥发的物质,车辆在静止、怠速以及加减速等多种工况下,油箱内都会产生大量汽油蒸汽,若不及时排出汽油蒸汽,油箱内气压会逐步升高,最终造成安全事故。考虑到环境保护及汽油的利用最大化,不是直接将汽油蒸汽排放到大气中,而是通过碳罐对其进行吸附并暂时储存。当满足一定条件后,碳罐电磁阀(即脱附阀)开始工作,利用发动机运行中产生的负压对碳罐进行脱附,将油蒸汽吸入进气歧管中,参与发动机的燃烧(图4)^[8-9]。

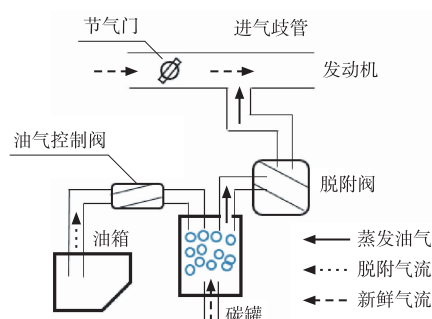


图4 碳罐工作原理示意图

为验证碳罐对该抖动的影响,断开碳罐电磁阀插件使其停止工作。此时座椅无间歇性抖动,采集座椅导轨振动数据,经快速傅里叶变换后得到振动频谱

(图5)。由图5可知, 11.6 Hz 和 12 Hz 频率消失, 表明这两个频率的振动是由碳罐电磁阀工作引起的。

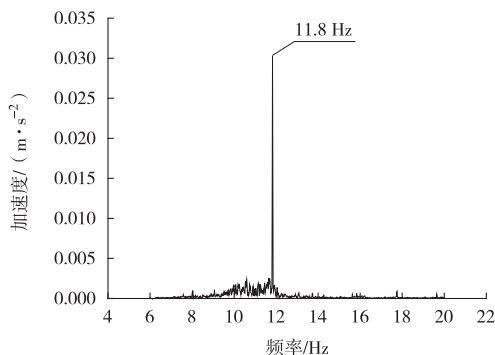


图5 碳罐电磁阀停止工作后座椅导轨振动频谱

由碳罐工作原理可知, 碳罐需通过脱附来恢复吸附的工作能力, 而脱附过程的一个重要参数是碳罐的电磁阀工作频率, 该频率决定了从碳罐中脱附出来的油蒸汽进入进气歧管的频率。采集碳罐电磁阀的工作电压, 经快速傅里叶变换后得到碳罐电磁阀工作频率为 12 Hz(图6)^[10]。

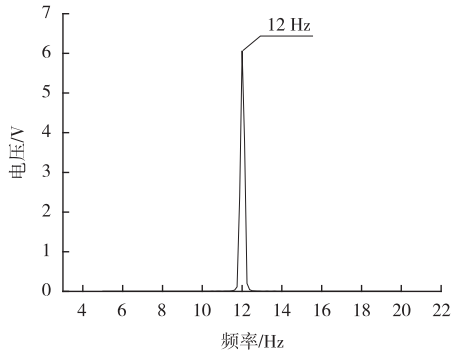


图6 碳罐电磁阀工作频率

采用缸压传感器对发动机的缸压进行测试(以发动机1缸为例, 测试结果如图7所示), 通过CAN总线采集发动机的进气压力(图8)。由图7和图8可知, 发动机的缸压和进气压力也表现出明显的周期性波动, 波动周期与座椅导轨抖动周期一致, 均为5 s。对进气压力进行快速傅里叶变换, 得到进气压力的频谱图(图9)。由图9可知, 压力波动主要峰值为 11.6 Hz 和 12 Hz 两个频率, 且与座椅导轨振动中最终导致缸内气压产生峰值波动的两个频率一致。其原理为从碳罐脱附出的油蒸汽进入进气歧管后, 与空气混合并进入发动机气缸。油蒸汽的加入会改变进气压

力, 进而影响气缸内的进气压力。进气压力的变化会进一步影响发动机的空燃比。当空燃比偏离理想值时, 燃烧过程将变得不稳定, 这种燃烧不稳定性可能引发发动机间歇性抖动。

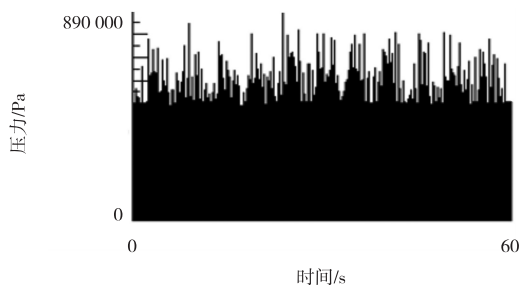


图7 发动机1缸缸压

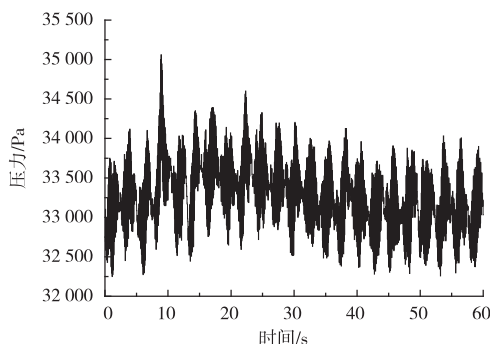


图8 进气压力时域图

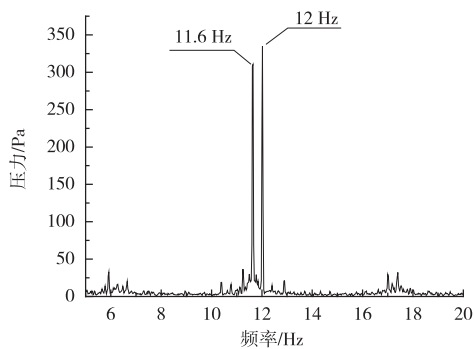


图9 进气压力频谱图

结合发动机1阶点火频率 11.8 Hz 和碳罐电磁阀工作频率 12 Hz, 根据调制信号计算公式^[11] $f_m = 2f_z - f_n$ (f_m 为调制前频率; f_n 为调制后频率; f_z 为载波频率), 可得出 $11.8 \text{ Hz} \times 2 - 12 \text{ Hz} = 11.6 \text{ Hz}$, 由此可初步判断 11.6 Hz 是碳罐电磁阀工作频率与发动机1阶点火频率调制出的频率。为验证上述判断, 将碳罐电磁阀工作频率分别设定为 12.8 Hz、13.8 Hz、14.8 Hz, 相应的座椅导轨振动测试结果如图10所示。按

上述推理,应分别出现调制后的振动峰值频率 10.8 Hz、9.8 Hz、8.8 Hz。从图 10 测试结果可知,调制后的振动峰值频率和推理结果一致。

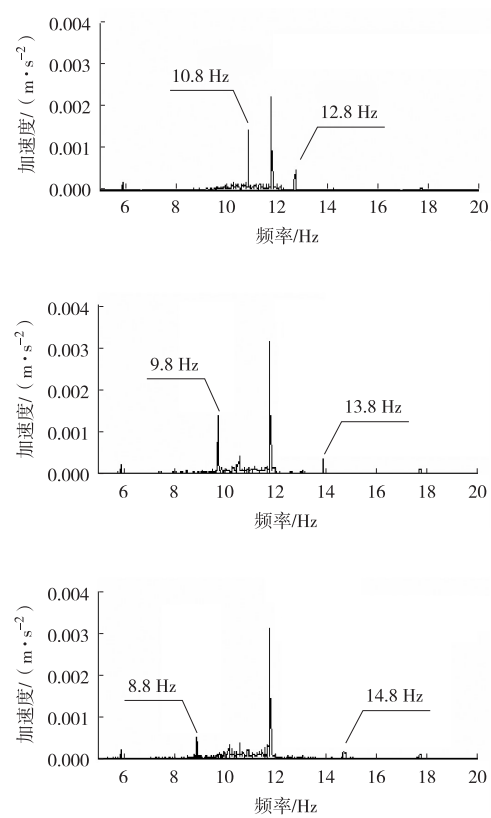


图 10 不同碳罐电磁阀工作频率下座椅导轨振动频谱

由图 10 可知,随着碳罐电磁阀工作频率的提升(即碳罐电磁阀工作频率与发动机 1 阶点火频率间隔加大),座椅导轨振动中发动机 1 阶点火频率下的振动量级无明显变化,但提升后的碳罐电磁阀工作频率及其对应调制频率下的振动量级逐步变小。同时,碳罐电磁阀工作频率提升后主观评价座椅导轨振动幅值逐步变小,但振动频率逐步提高。由此可以确定,11.6 Hz 为碳罐电磁阀工作频率与发动机 1 阶频率调制出的频率。

综合以上分析,可得出以下结论:油蒸汽经碳罐电磁阀工作脱附后会影响到缸内油气混合气的比例,从而影响到缸内燃烧稳定性,导致激励源发动机产生间歇性振动,最终导致座椅导轨的抖动。碳罐电磁阀工作频率 f_1 与发动机 1 阶点火频率 f_0 调制产生出新的频率 f_2 ,可认为 f_2 是虚假频率,并无实际物理意义。 f_1 和 f_0 拍频产生了间歇性振动,随着 f_1 和 f_0 频率间

隔逐步变大,拍频振动现象越来越弱。根据周期 $T=1/|f_1-f_0|$ 可以得出,拍频振动(抖动)周期越来越短。

2.2 动力总成刚体模态的影响分析

整车坐标系如图 11 所示^[12],规定绕 X 轴的旋转运动为 Roll,绕 Y 轴的旋转运动为 Pitch,绕 Z 轴的旋转运动为 Yaw。在整车坐标系下,对动力总成刚体模态进行测试,所用设备包括 1 套 LMS SCADS 数据采集系统、若干三向加速度计、1 个力锤和 1 台笔记本电脑。刚体模态频率的测试结果见表 1。由表 1 可知,Pitch 模态频率与问题频率最为接近。

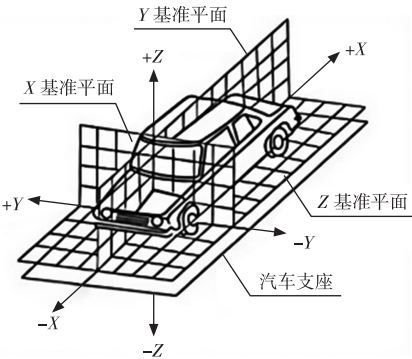


图 11 整车坐标系

表 1 动力总成刚体模态频率

方向	频率/Hz	方向	频率/Hz
Fore/Aft	11.3	Roll	12.3
Lateral	7	Pitch	11.6
Bounce	8.6	Yaw	15.2

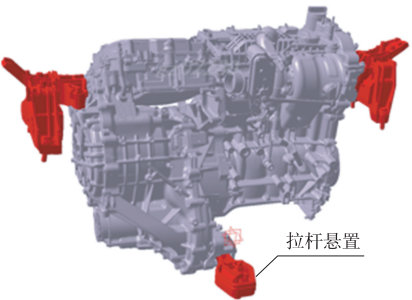


图 12 发动机三点钟摆式悬置系统

该车发动机悬置的布置为三点钟摆式(又称惯性主轴支撑式或扭矩轴式),如图 12 所示。在三点钟摆式悬置系统中,拉杆悬置的刚度和阻尼特性对 Pitch 模态起决定性作用^[13]。为了验证 Pitch 模态对该问题的影响,将拉杆悬置的橡胶刚度提高 30%,得到新

的动力总成刚体模态频率见表2。由表2可知,提升拉杆刚度后,Pitch模态频率变化最大(提高2.3 Hz,频率变化率为19.8%)。

表2 提升拉杆悬置刚度后的动力总成刚体模态频率

方向	拉杆刚度提高30%后的频率/Hz	频率变化率/%
Fore/Aft	11.6	2.6
Lateral	7.9	12.9
Bounce	9	4.7
Roll	12.4	0.8
Pitch	13.9	19.8
Yaw	16.1	5.9

将拉杆悬置橡胶刚度提高30%后,保持碳罐电磁阀处于工作状态,工作频率仍为原来的12 Hz,再次进行整车怠速间歇性抖动测试,得到座椅导轨抖动频谱如图13所示。由图13可知,Pitch模态频率提升后,座椅导轨振动量级明显降低,但振动频率特征未发生变化。由此可得出,当动力总成的Pitch刚体模态频率与怠速1阶频率接近时,对间歇性抖动的抖动量级有明显放大作用,但对抖动频率特征无影响,进一步说明座椅导轨间歇性抖动的频率特征仅与激励源发动机相关,而与传递路径悬置无关。

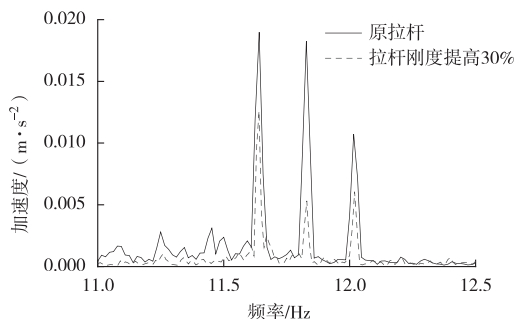


图13 拉杆刚度提高30%前后座椅导轨抖动频谱对比

综合以上分析可知:碳罐电磁阀工作频率会影响抖动频率特征及抖动量级,而动力总成的刚体模态仅影响抖动量级。该车怠速间歇性抖动的真正原因如下:碳罐电磁阀工作频率(12 Hz)与怠速1阶激励(11.8 Hz)拍频,导致激励源上产生周期为5 s($1/(12-11.8)=5$)的间歇性抖动特征,动力总成Pitch模态频率(11.6 Hz)与激励源频率(11.8 Hz/12 Hz)耦合,在传递路径上放大了座椅导轨的抖动量级。

3 改进方案及验证

3.1 改进方案

根据上述机理分析,分别从优化激励源和传递路径出发,提出以下两种改进方案:

1) 将碳罐电磁阀的工作频率与发动机1阶点火频率错频。发动机原怠速转速为708 r/min,为实现发动机1阶点火频率与碳罐电磁阀工作频率错频1 Hz以上,发动机转速应为636 r/min以下或780 r/min以上。其中发动机转速在636 r/min以下时,转速过低,会导致怠速转速不稳;而发动机转速在780 r/min以上时,转速过高会引起发动机噪声增大。故维持发动机转速708 r/min不变,从优化碳罐电磁阀工作频率方向采取措施。为避免碳罐电磁阀工作频率与怠速2阶(23.6 Hz)产生拍频,现将碳罐电磁阀工作频率优化为16 Hz。

2) 优化动力总成Pitch刚体模态频率。为使动力总成Pitch模态与碳罐电磁阀工作频率16 Hz和发动机1阶点火频率11.8 Hz错频,根据2.2节分析,将发动机的拉杆悬置橡胶刚度提高30%,动力总成Pitch模态频率提升至13.9 Hz,三个频率彼此错频均在2 Hz以上。

3.2 效果验证

同时实施上述两种改进方案后,对座椅导轨振动进行测试,改进前后的座椅导轨振动对比如图14所示(图中只截取了有明显振动信号的频段),振动量级由 0.05 m/s^2 降低至 0.01 m/s^2 ,降幅达到80%,改进效果显著。随后,对优化后的样车进行主观评价,发现座椅导轨抖动现象基本消失。

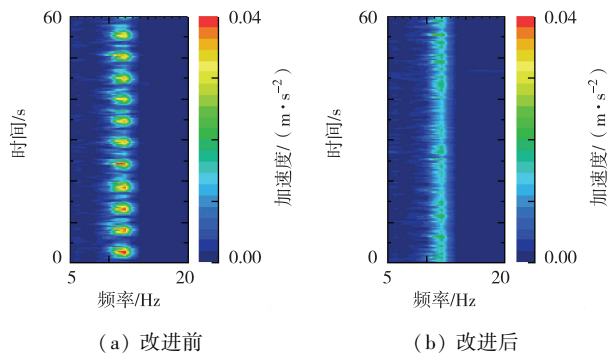


图14 座椅导轨振动对比

(下转第66页)

PTC 加热器。两种加热器虽各有特点,但两者的加热性能均满足要求。

参考文献:

- [1] 伟巴斯特高压电加热器 HVH100[J]. 汽车观察,2019(4): 194.
- [2] 何煜,张薇,汪琳琳. 电车电加热技术路线综述及潜力分析[J]. 汽车实用技术,2023,48(12):35-38.
- [3] 吴亚玲,黎先梁,杨绪锋,等. 电动汽车电排用浸塑聚氯乙烯老化研究及寿命预测[J]. 汽车工艺与材料,2022(1): 32-37.
- [4] 河北凯途汽车零部件科技有限公司. 高压电加热器产品介绍[Z]. 2021.
- [5] 深圳市赛尔盈电子有限公司东莞分公司. PTC 电加热器技术规格书 S9088[Z]. 2022.
- [6] 丁士文,潘彬,啜艳明. 烧结工艺对 BaTiO₃ 基 PTC 热敏电

阻材料性能的影响[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2011,31(5):486-490.

- [7] 桑泽康,赵锐,程文龙. 低电阻率陶瓷基 PTC 材料温控特性研究[J]. 北京航空航天大学学报,2023,49(8):2147-2153.
- [8] 赵书美,魏冬. 电动汽车电池加热器控制方法的优化研究[J]. 光源与照明,2021(3):84-85.
- [9] 王昌,包顺强. 基于能效比的多冷热源系统联合控制分析[J]. 建筑电气,2020(5):22-26.
- [10] LV H W, GUO W X, CHEN M, et al. Rational construction of thermally stable single atom catalysts; from atomic structure to practical applications[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2022, 43(1):71-91.
- [11] 高驰. 混动和纯电动时代的座舱和电池加热方案, 聊博格华纳高压液体加热器[J]. 汽车与配件, 2020(23):38-39.

(上接第 57 页)

4 结束语

本文通过对座椅导轨间歇性抖动产生机理进行分析,明确了间歇性抖动频率特征与抖动幅值的影响因素,提出了优化碳罐电磁阀工作频率和优化动力总成 Pitch 模态频率两种方案。最终座椅导轨振动量级由 0.05 m/s^2 降低至 0.01 m/s^2 ,降幅达 80%,改善效果显著。

参考文献:

- [1] 陈连庭,腾建耐. 某款汽车怠速间歇性抖动问题的优化研究[J]. 时代农机,2018,45(9):70-73.
- [2] 王健,杨思,史晓宁,等. 整车怠速不规则抖动控制方法及试验研究[J]. 内燃机,2019(12):43-46.
- [3] SENDUR P, KURTERE A. Application of finite element based simulation and modal testing methods to improve vehicle powertrain idle vibration[J]. ASRO Journal of Applied Mechanics, 2017,2(1):10-31.
- [4] 陈达亮,吕静,李洪亮. 动力总成悬置系统怠速隔振优化策略研究[J]. 噪声与振动控制,2011,31(5):53-57.

- [5] 王金立,钱海青,李凯. 某 SUV 催化器起燃阶段间歇性抖动的试验研究[J]. 汽车技术,2021(4):26-30.
- [6] 相龙洋,顾彦,黄亚. 汽车怠速间歇性异常抖动研究[J]. 测试试验,2019(8):136-138.
- [7] 杨胜,孔刚,任护党,等. 某 4×6 自卸车底盘怠速振动问题分析与研究[J]. 重型汽车,2023(4):16-18.
- [8] 林志昌,邵亚宾,周宇翔. 脱附流量对炭罐蒸发排放性能的影响[C]//中国汽车工程学会. 2020 年中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2020:2107-2110.
- [9] 贺赵霞. 车辆碳罐电磁阀噪音问题的解决[J]. 汽车实用技术,2020(5):65-67.
- [10] 孙建军,秦万里,卢维伟,等. 碳罐脱附策略对混动车辆汽油机怠速燃烧影响研究[J]. 汽车实用技术,2021,46(21):145-148.
- [11] 丁康,孔正国. 振动调幅调频信号的调制边频带分析及其解调方法[J]. 振动与冲击,2005,24(6):9-12.
- [12] 黄英豪,黎兆宇. 汽车坐标系和车身姿态角的确定方法[J]. 装备制造技术,2012(10):113-115.
- [13] 石岩,白炜,王志卫. 动力总成悬置布置形式对启动振动的影响研究[J]. 北京汽车,2019(1):38-43.