

• 一汽解放优秀论文专题 •

牵引车低阻进气系统对驾驶室内噪声的影响 分析与优化

李国军 贾昭远 李冠霖 毕大鹏 王功珂 张龙飞

(一汽解放汽车有限公司, 长春 130011)

【摘要】为降低某牵引车低阻进气系统对驾驶室内噪声的影响,基于模态仿真分析和台架模态测试,建立进气系统模态仿真模型,对影响驾驶室内噪声的进气系统主要阶次噪声进行定位、定频,并利用该模型研究了进气系统进气道总成、空气滤清器总成和底座总成噪声的特点、相应降噪措施及效果,通过精准控制上述主要总成的模态并进行优化设计,有效降低了驾驶室内噪声。

关键词:牵引车 进气噪声 模态分析 车内噪声

中图分类号:U464.141 **文献标志码:**A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240359

Analysis and Optimization of the Influence of Tractor Low-Resistance Intake System on Interior Noise

Li Guojun, Jia Zhaoyuan, Li Guanlin, Bi Dapeng, Wang Gongke, Zhang Longfei

(FAW Jiefang Automobile Co., Ltd., Changchun 130011)

【Abstract】To reduce the influence of the tractor low-resistance intake system on the cab interior noise, a modal simulation model of the intake system is established, and the main modal noise frequencies that affect the interior noise are located and defined. The paper studies the characteristics, noise reduction measures of intake system air passage assembly, air filter assembly and base assembly, along with the corresponding noise reduction measures and effects. The modal characteristics of the above assemblies are precisely controlled and optimized, which effectively reducing the overall interior noise of the vehicle.

Key words: Tractor, Intake noise, Modal analysis, Interior noise

【引用格式】李国军,贾昭远,李冠霖,等.牵引车低阻进气系统对驾驶室内噪声的影响分析与优化[J].汽车工程师,2025(2):22-29.

LI G J, JIA Z Y, LI G L, et al. Analysis and Optimization of the Influence of Tractor Low-Resistance Intake System on Interior Noise[J]. Automotive Engineer, 2025(2): 22-29.

1 前言

进气噪声是半挂牵引车的主要噪声之一。半挂牵引车进气系统的进气道口布置在驾驶室背面或侧面,进气噪声极易传入驾驶室内,从而对驾驶员产生干扰。

牵引车进气系统的噪声来源主要包括发动机脉动噪声^[1]和空气压缩机脉动噪声,空气压缩机功率较大且启动频繁,其噪声甚至超过发动机脉动噪声。针对采用天然气发动机的车型,防喘振阀接口

和闭式曲轴箱通风也会成为噪声来源。上述噪声源产生的噪声经过进气系统衰减、放大并传递到驾驶室内部或外界环境,主要传递路径有:发动机进气门周期性开合在进气管路中产生的气压波动经进气道口直接传递至外界;进气系统部件,如进气道总成、底座总成、空气滤清器总成的壁面受到激励发生振动而产生噪声辐射;经由进气道总成与车体壁面相连部分的结构传递。其中,通过进气管口传递至外界的噪声贡献量最大^[2],进气系统部件模态对驾驶室内舒适性影响较大。

目前,针对牵引车进气系统模态对驾驶室内声品质的影响研究很少。本文通过模态测试和模态仿真相结合的方法分析驾驶室内噪声的影响因素,并通过仿真分析进气系统消声能力,进而进行低阻进气系统辐射噪声定位、定频,通过对进气道总成、空气滤清器总成和底座总成进行模态仿真分析,并结合工艺、结构分析制定模态优化方案,最后开展实车验证。

2 低阻进气系统及整车噪声测试

2.1 进气系统结构

牵引车进气系统的主要功能是为发动机提供足量、清洁、干燥和低温的空气,由空气滤清器总成、进气道总成、减振块总成、连接波纹管总成、底座总成、连接胶管隔热罩等部件构成,如图1所示。

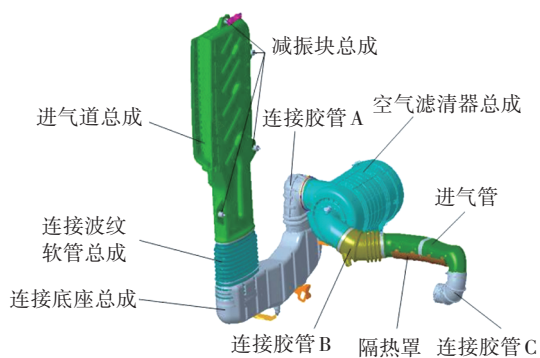
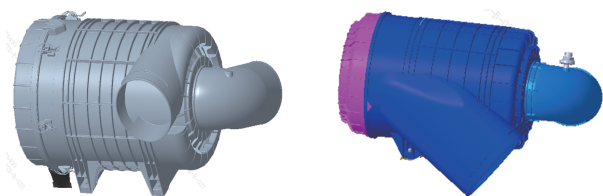


图1 进气系统组成

2.2 低阻进气系统

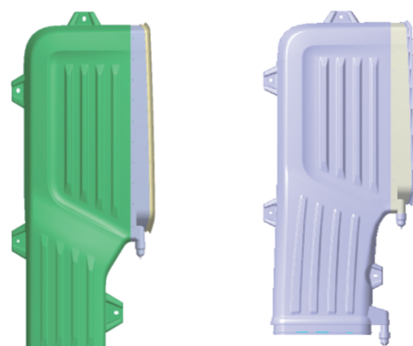
随着整车发动机排量逐渐增大,为降低整车油耗和提升动力性,需要降低进气系统的阻力。为此,对进气系统关键部件进行了性能开发:大流量、低阻空气滤清器总成可在 $30\text{ m}^3/\text{min}$ 的进气流量下实现阻力降低 0.5 kPa ,如图2所示;低阻进气道总成可在 $30\text{ m}^3/\text{min}$ 的进气流量下实现阻力降低 0.6 kPa ,如图3所示。

整车换装低阻空气滤清器总成、进气道总成后,在整车转毂试验台架上测试获得的进气系统阻力如图4所示。



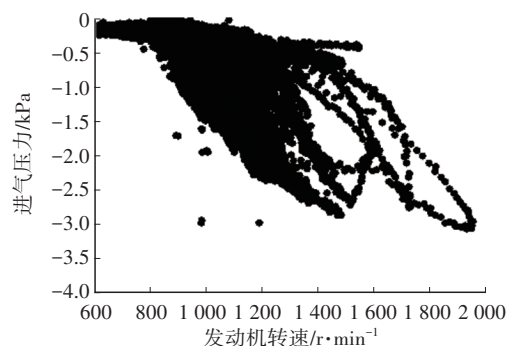
(a)基础空气滤清器总成 (b)低阻空气滤清器总成

图2 基础、低阻空气滤清器总成

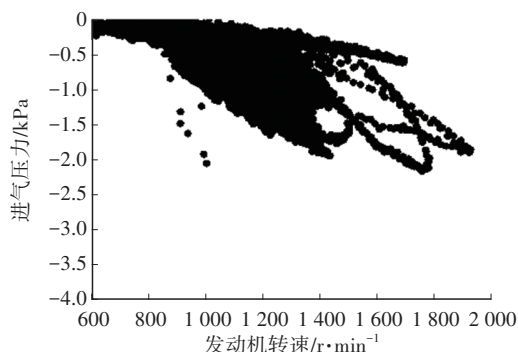


(a)基础进气道总成 (b)低阻进气道总成

图3 基础、低阻进气道总成



(a)基础进气系统



(b)低阻进气系统

图4 基础、低阻进气系统阻力测试结果

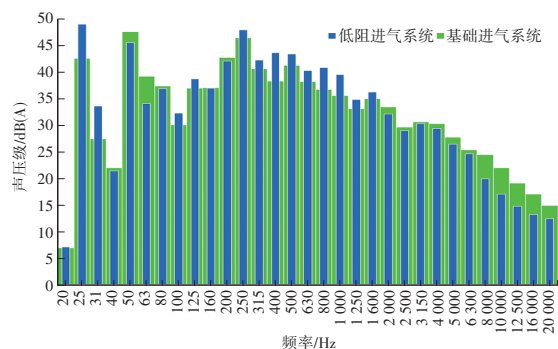
由图4可知,采用低阻进气系统后,在整车常用的 $1\ 000\sim 1\ 400\text{ r}/\text{min}$ 发动机转速区间内,进气阻力明显降低,其中,在 $1\ 400\text{ r}/\text{min}$ 转速下进气系统阻力降低 0.85 kPa 。

2.3 低阻进气系统整车噪声测试

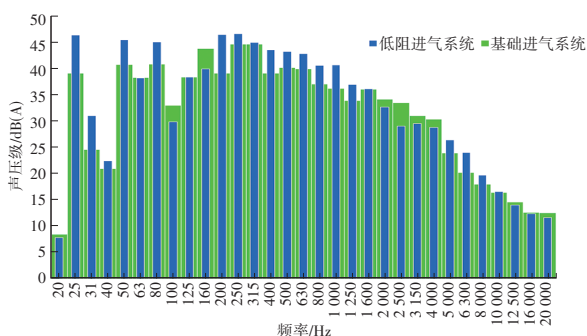
换装低阻空气滤清器总成、进气道总成后,怠速工况下整车噪声测试结果如表1、图5所示。由表1可知,驾驶室内驾驶员右耳噪声提高 2.6 dB(A) 、驾驶员左耳噪声提高 2.7 dB(A) 、卧铺位置噪声提高 2.6 dB(A) ,进气口噪声基本不变。由图5可知,驾驶员右耳、左耳、卧铺位置噪声在 $80\sim 500\text{ Hz}$ 范围内的多个频带增大,进气口噪声在 315 Hz 附近增大。

表1 怠速工况下整车噪声测试结果 dB(A)

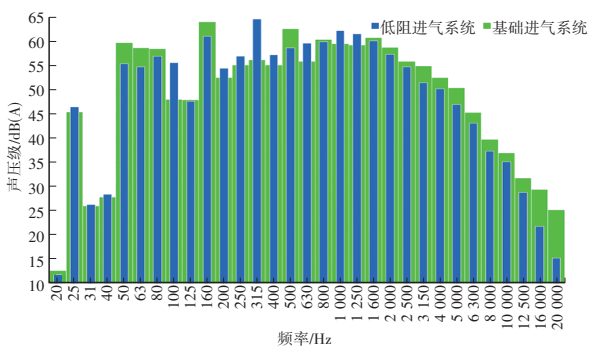
方案	噪声声压级			
	驾驶员右耳	驾驶员左耳	卧铺	进气口
基础进气系统	53.2	52.7	52.7	71.6
低阻进气系统	55.6	55.4	56.1	71.8



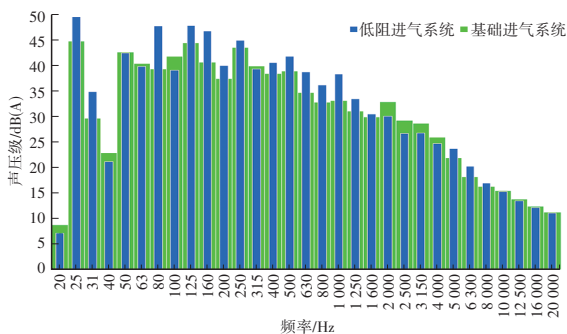
(a) 驾驶员右耳



(b) 驾驶员左耳



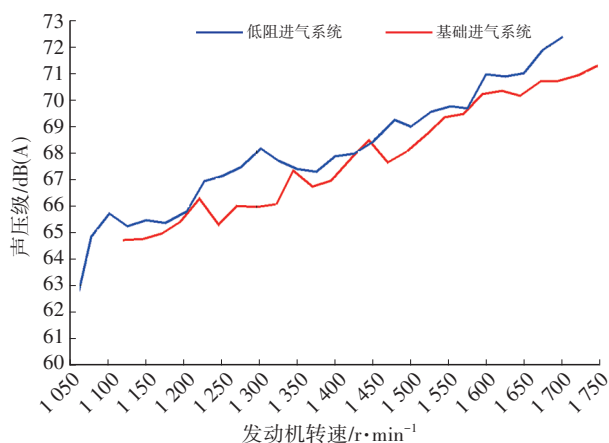
(c) 卧铺



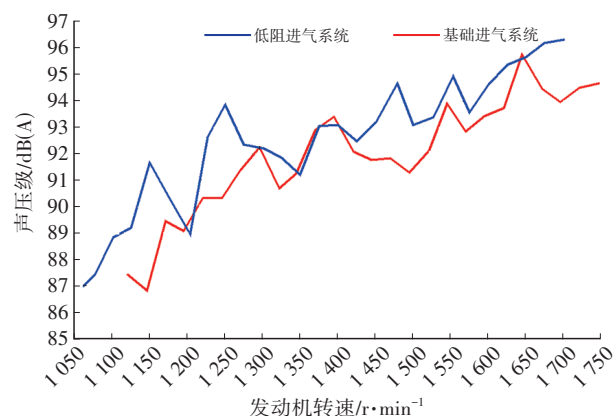
(d) 进气口

图5 怠速工况下各测试点噪声测试结果

满载加速工况下整车噪声测试结果如图6所示,驾驶员右耳和进气口噪声均增大。



(a) 驾驶员右耳



(b) 进气口

图6 满载加速工况下驾驶员右耳和进气口噪声测试结果

针对低阻进气系统方案,怠速工况下,进气管口噪声目标达成,驾驶员右耳、左耳和卧铺位置的噪声均未达到目标要求,满载加速工况下,驾驶员右耳和进气口噪声目标未达成。主观评价结果显示,驾驶室内可明显听到进气系统“咚咚”声。

由于驾驶员右耳、左耳和卧铺位置噪声的频率集中在80~500 Hz范围内的多个频带,需分析进气系统对驾驶室内噪声的影响、传递途径和进气系统噪声产生机理,并进行优化。

3 进气系统噪声产生机理

对低阻进气系统在0~500 Hz范围内的消声能力仿真数据进行分析,如图7所示,进气系统在30 Hz、80 Hz、120 Hz、200 Hz和300 Hz频带消声能力相对较弱,其中30 Hz、80 Hz频带噪声源位于空气滤清器总成前端的进气道总成和底座总成。

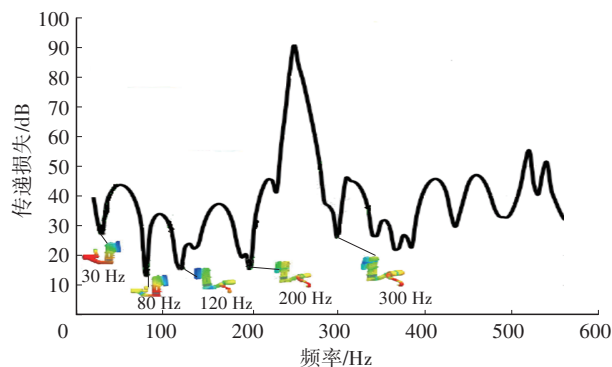
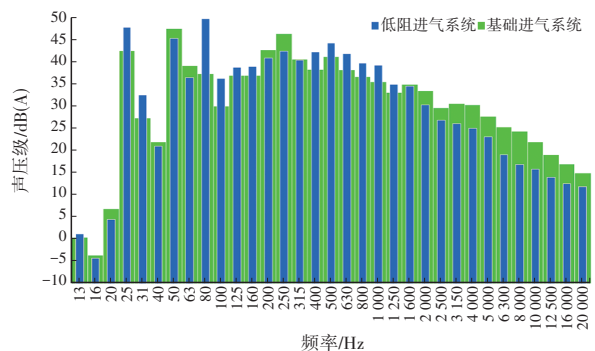


图7 低阻进气系统方案传递损失仿真结果

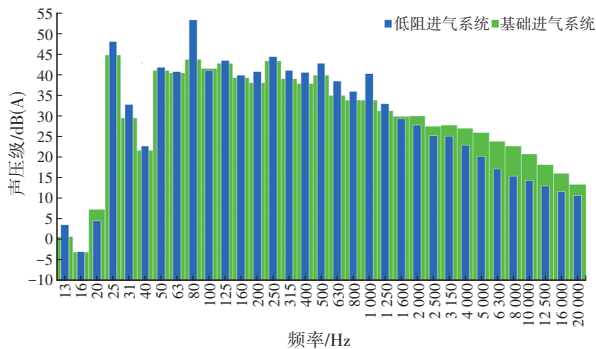
为了验证仿真分析结果,在基础进气系统方案基础上仅更换低阻进气道总成,如图8所示,并开展驾驶室内噪声测试和进气道表面模态测试。测试结果如图9、图10所示,驾驶员右耳和卧铺位置噪声在80 Hz频带明显提高,进气道表面在80 Hz频段存在明显的峰值,表明共振是驾驶室内噪声的来源。



图8 低阻进气系统进气道总成模态测试



(a) 驾驶员右耳



(b) 卧铺位置

图9 仅更换低阻进气道总成时驾驶室内噪声测试结果

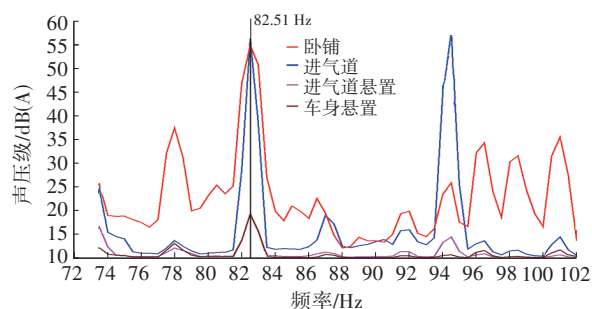


图10 进气道模态测试结果

空气滤清器模态仿真分析结果如图11所示,进气口在105 Hz频带存在共振模态,共振频率小于发动机3阶激励频率,存在共振风险。

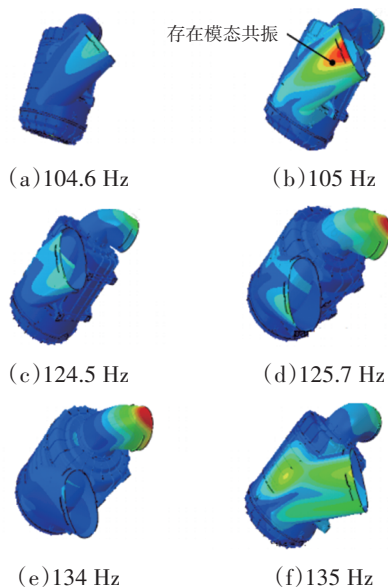


图11 不同频率下空气滤清器总成模态仿真分析振型图

进气系统底座总成模态仿真分析结果如图12所示,底座出气口处存在90.2 Hz频带2阶共振点,存在共振风险。

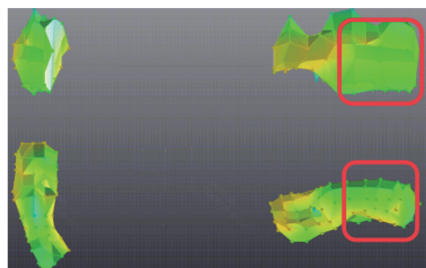


图12 底座总成模态仿真分析结果

低阻进气道总成模态仿真结果如图13所示,进气口、进气道表面存在多处80 Hz共振点,是发动机和空气压缩机噪声传递到进气系统,进而传递到进气道总成的,并且由于进气系统在80 Hz频带处的消声能力不足,对进气道的共振点产生激励形成共振,并通过辐射传递到驾驶室内,造成驾驶员右耳、

左耳和卧铺位置噪声异常升高。

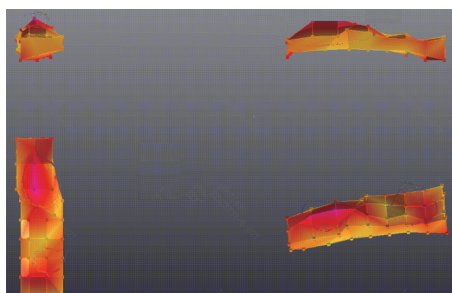


图13 进气道总成模态仿真分析结果

根据进气道总成模态仿真分析结果,并考虑进气道阻力、雨水分离性能、制造工艺性等维度,制定4种模态优化方案,如图14所示。

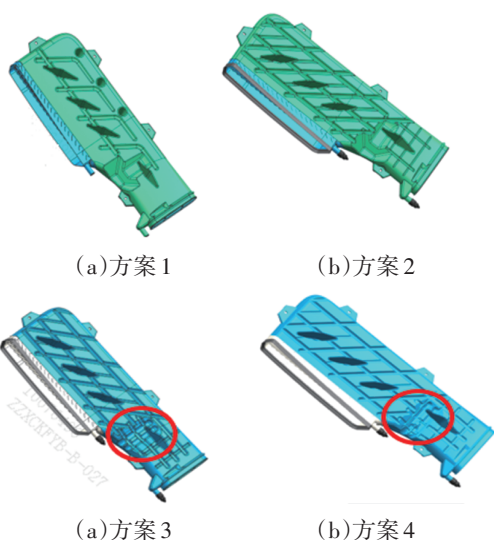


图14 进气道总成模态优化方案

方案1主要考虑原有模具不变,在进气口格栅内部采用“目”型支撑结构,改善进气口格栅处的模态;方案2在1基础上,在进气道靠近车身侧表面增加网络型结构,优化进气道靠近驾驶室侧平面的模态;方案3在2基础上,在进气道增加网络型和优化水滴型对顶结构;方案4在方案3基础上优化网络型结构的宽度、深度和分布情况。

采用模态仿真分析方法,对4种进气道模态优化方案进行1~6阶次共振频率仿真分析,仿真结果如表2所示。

表2 进气道模态优化方案各阶次共振频率仿真结果 Hz

方案序号	共振频率					
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
1	54.0	68.0	81.0	94.0	112.0	160.0
2	60.7	82.0	89.4	102.6	108.0	124.9
3	60.0	87.7	90.2	103.0	107.8	122.0
4	60.2	87.0	90.1	102.8	108.0	122.5

仿真结果表明:方案1进气口格栅处模态改善,但是在进气道靠近进气口侧仍存在3阶共振频率81 Hz;方案2整个平面的模态改善,但局部存在2阶共振频率82 Hz;方案3对应部位共振频率为87.7 Hz,可规避中心频率80 Hz±5 Hz范围内的共振风险;方案4的2阶、3阶和4阶频率相对方案3微有下降,无模态改善。

针对方案3进行计算流体力学仿真,分析进气道阻力、雨水分离性能,结果与优化前方案相当,模具工艺分析结果显示,方案3可在现有模具上通过修模实现。综上,方案3为最优方案。

4 进气系统的模态结构优化

4.1 进气道总成模态优化

根据进气道模态仿真分析结果(图13),考虑共振点模态分布,以及进气道阻力、雨水分离性能、制造工艺性等维度制定模态优化方案。

首先,在进气口格栅的内部采用“目”型结构,进气道中布置类似水滴型对顶结构,并通过仿真优化,实现噪声波能量吸收和衰减,降低传递到驾驶室内部的噪声,如图15所示。

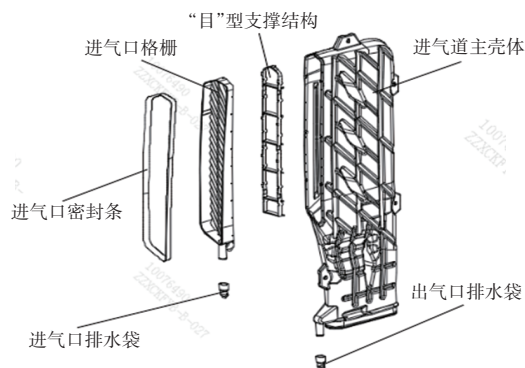


图15 进气道模态优化结构

在进气道面向驾驶室侧的表面采用网络型结构,实现噪声波吸收以及逐级消耗,减小或消除通过辐射传递到驾驶室内部的噪声,如图16所示。

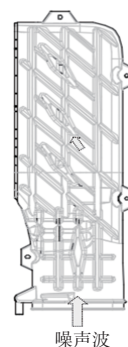


图16 进气道模态优化表面

对进气道进行模态仿真分析,结果如图17所示,在前6阶共振频率处进气道表面模态共振范围明显缩小,特别是在80 Hz±5 Hz频率段没有共振点。同时,利用快速成型件进行台架测试迭代,并最终通过了整车验证。

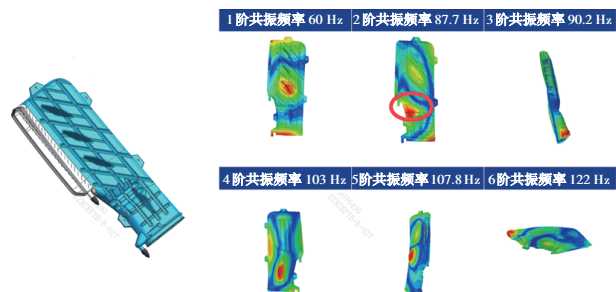
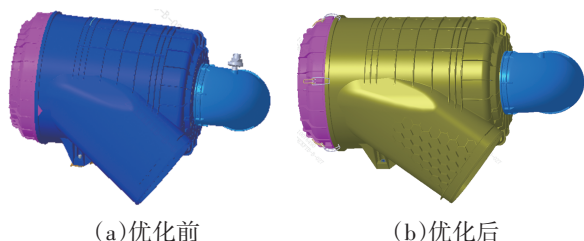


图17 进气道模态优化仿真分析结果

4.2 空气滤清器总成模态优化

在空气滤清器进气口表面采用蜂窝状六边形加强筋提升表面模态频率,如图18所示。



(a)优化前

(b)优化后

图18 空气滤清器进气口模态优化结构

对空气滤清器总成进行模态仿真分析,结果如图19所示,在3阶内空气滤清器进口模态频率达到130 Hz以上,规避了发动机3阶激励。

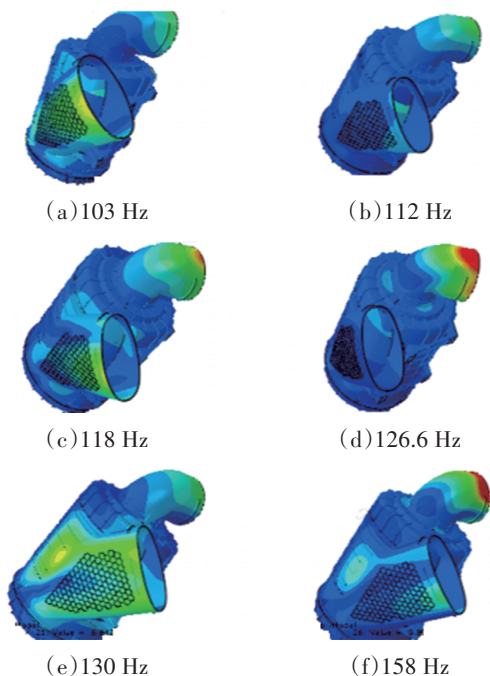


图19 不同频率下空气滤清器进气口模态优化仿真分析振型图

4.3 底座总成模态优化

如图20所示,在底座总成的出气口增加金属支撑,以提升其模态频率,通过制作快速成型件开展台架测试,并最终通过整车测试。

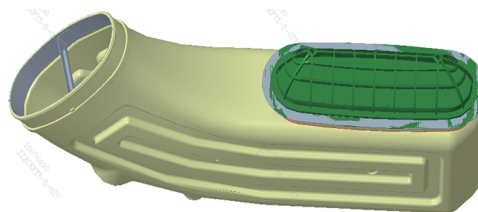


图20 底座总成出气口模态优化结构

5 进气系统模态优化方案验证

根据进气系统模态优化方案,完成相应部件模具修改并生产正式样件,在试验车上换装,如图21所示,验证优化方案的有效性。

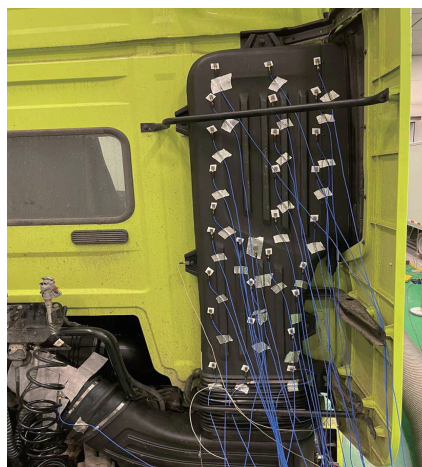


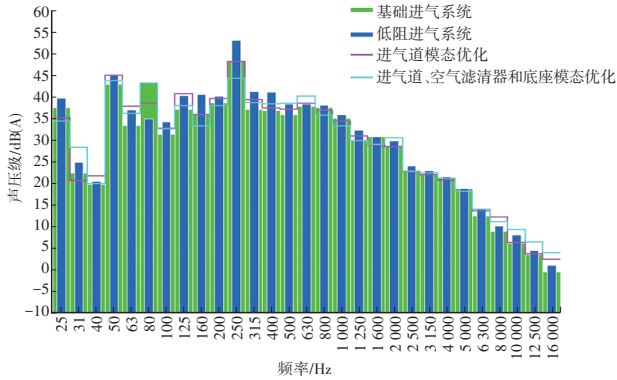
图21 进气系统模态优化方案换装

5.1 怠速工况验证

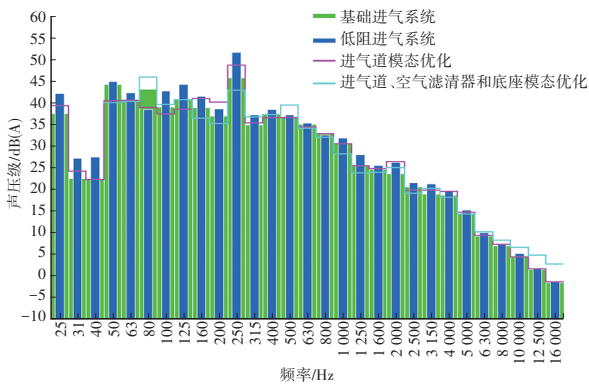
怠速工况下模态优化方案测试结果如表3、图22所示:仅换装模态优化的进气道总成,驾驶员右耳、左耳和卧铺位置噪声声压级明显降低,与原进气系统相当,但仍可听到轻微的“砰砰”声;同时更换经模态优化的进气道总成、空气滤清器总成和底座总成,驾驶员右耳、左耳、卧铺和进气口位置的噪声声压级显著降低,主观评价驾驶室内没有“砰砰”声。

表3 怠速工况下模态优化方案测试结果 dB(A)

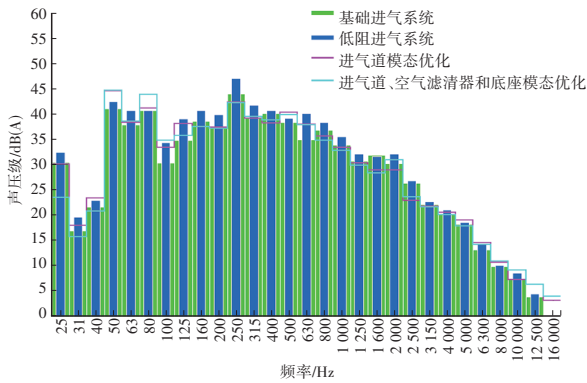
方案	噪声声压级			
	驾驶员右耳	驾驶员左耳	卧铺	进气口
基础进气系统	53.2	52.7	52.0	71.6
低阻进气系统	55.6	55.4	55.0	71.8
进气道模态优化	52.5	52.7	52.3	71.1
进气道+空气滤清器+底座模态优化	51.4	51.1	51.3	70.4



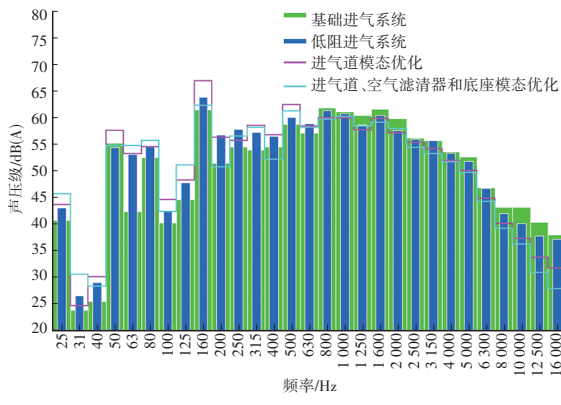
(a) 驾驶员右耳



(b) 驾驶员左耳



(c) 卧铺位置



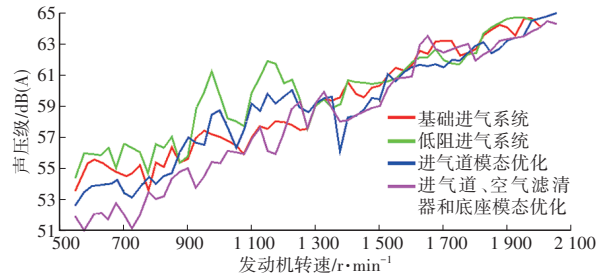
(d) 进气口

图22 怠速工况噪声频谱对比

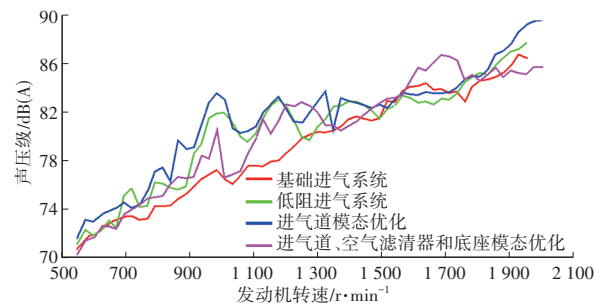
5.2 定置升速工况验证

定置升速工况下,驾驶员右耳和卧铺位置噪声

如图23所示,两处噪声声压级显著降低,主观评价驾驶室内没有听到“砰砰”声。



(a) 驾驶员右耳

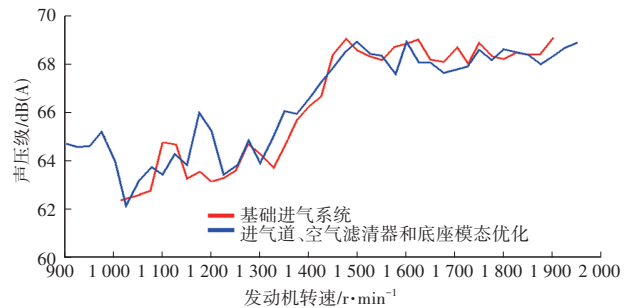


(b) 卧铺位置

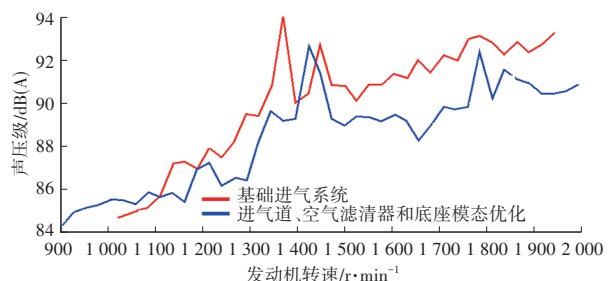
图23 定置升速工况下噪声测试结果

5.3 满载加速工况验证

满载加速工况下,驾驶员右耳和进气口噪声如图24所示,两处噪声声压级显著降低,主观评价驾驶室内没有“砰砰”声。



(a) 驾驶员右耳



(b) 进气口

图24 满载加速工况下噪声测试结果

6 结束语

本文通过研究进气系统模态对车内噪声的影

响,采用模态仿真、台架测试和整车测试等方法,实现了对影响车内噪声的进气噪声的定位、定频,并提出通过模态仿真分析和台架模态测试相结合的方法,提升模态仿真分析精度,以此为基础对进气道总成、空滤器总成和底座总成进行了模态优化方案设计,并通过整车怠速工况、定置升速工况和满载加速工况开展试验验证。验证结果表明,所提出的模态优化方案有效。

参考文献

[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: 216-256.

PANG J, SHEN G, HE H. Automotive Noise and Vibration: Principle and Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 216-256.

[2] 叶连生. 某重卡进气系统噪声分析与控制研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.

YE L S. Noise Analysis and Control Research on Heavy Truck Intake System[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2024年12月4日。

2025年《汽车技术》专项征稿启事

尊敬的汽车及相关技术领域专家学者、研发工程师、高校师生:

随着汽车技术的飞速发展,2025年将见证多项关键技术的突破与应用。《汽车技术》杂志作为中国汽车行业的核心学术期刊,特此发布2025年专项征稿启事,聚焦以下十大技术征稿方向,以期推动汽车技术的创新与进步。

1. **多模态大模型在自动驾驶感知决策中的应用**:研究多模态大模型技术推动自动驾驶感知决策能力的创新突破。

2. **跨域融合智能芯片技术**:研究跨域融合智能芯片在汽车智能化控制系统中的应用,以及其对性能协同的影响。

3. **AI赋能的合成数据在自动驾驶研发中的应用**:研究利用AI技术生成合成数据,解决自动驾驶数据短缺问题。

4. **AI大模型在智能座舱中的多模态交互技术**:研究AI大模型如何整合视觉、听觉、触觉等多种感官信息,实现更加自然和直观的人机交互体验。

5. **C-V2X技术在车路云一体化中的应用**:研究C-V2X技术如何支持车路云一体化,包括车车通信(V2V)、车路通信(V2I)、车云通信(V2N)等关键技术的发展和应用。

6. **智能底盘新构型及集成控制技术**:研究智能底盘线控化、分布式驱动、动底融合控制、智能底盘与自动驾驶融合控制等关键技术。

7. **新能源乘用车百公里行驶电耗降低技术**:研究如何通过硬件创新和软件优化降低电耗,提升整车续航里程。

8. **固态电池电解质材料创新与界面工程优化**:研究氧化物、硫化物、聚合物等固态电解质材料的最新研究进展,以及固态电池中电极与电解质之间的界面问题,提高电池的充放电效率和循环稳定性。

9. **电池系统安全技术**:研究主被动一体化的热安全防护、热失控早期火灾探测预警、灭火装置等。

10. **高效高密度电驱动总成技术**:研究具有更高转速、更高效率和更小型化的电驱动系统技术。

征稿要求:

1. 投稿请注明“*****”技术方向专项征稿字样,本刊对符合征稿方向的稿件将优先审核,一经录用优先发表;

2. 文章字数控制在6000~8000字范围之内;

3. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;

4. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,并在文中标注文献引用处;

5. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;

6. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;

7. 请勿一稿多投;

8. 本刊使用网站投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,网址:<http://qjcs.cbpt.cnki.net>。

这些技术方向反映了汽车技术领域的最新研究热点,《汽车技术》杂志诚邀广大科研人员围绕这些方向投稿,我们期待您的佳作,共同推动汽车技术的发展与创新。感谢您对《汽车技术》杂志的支持与贡献!

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库收录期刊。

《汽车技术》编辑部