

乘用车关门声品质影响因素研究与优化

王恒,申秀敏,龙伟,李利明,郭常立
(重庆赛力斯新能源汽车设计院有限公司,重庆 401135)

摘要:以某自主品牌乘用车为研究平台,针对其关门声品质较差的现象展开测试、评价、诊断和优化工作。通过主观评价和客观测试找出影响样车关门声品质差的主要原因。采用独立运行法,对影响车门声品质的各主要因素进行优化,通过客观测试分析各因素对车门声品质响度和尖锐度的贡献量,对各优化方案进行主客观评价。结果表明:多措施集成的优化方案最终使得样车的车门声品质得到了显著改善,主观评价价值比优化前提高了31.9%,客观测试结果也优于对标车。

关键词:声学;乘用车;关门声品质;主观评价;客观测试;优化设计

中图分类号:U467.1 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2023)06-0203-04

Research and Optimization of Factors Affecting Quality of Passenger Car Door Closing Sound

WANG Heng, SHEN Xiumin, LONG Wei, LI Liming, GUO Changli

(Chongqing Sailisi New Energy Automobile Design Institute Co., Ltd., Chongqing 401135, China)

Abstract: With a passenger car of a self-owned brand taken as a research platform, the poor door closing sound quality was tested, evaluated, diagnosed and optimized. The main reasons for the poor sound of the prototype vehicle were found out by subjective evaluation and objective tests. The independent operation method was adopted to optimize the main factors affecting the sound quality of the door, the contribution of each factor to the loudness and sharpness of the sound quality of the door was analyzed through objective testing, and the subjective and objective evaluation of each optimization scheme was conducted. The results show that the multi-measure integrated optimization scheme significantly improves the door sound quality, the subjective evaluation value increases by 31.9% compared with the one before optimization, and the objective test result is better than that of the benchmark car.

Keywords: acoustics; passenger cars; door sound quality; subjective evaluation; objective test; optimized design

0 引言

伴随生活水平的提高和近年来80后、90后驾驶员的增多,人们对汽车的舒适性越发看重,而汽车舒适性主要体现在NVH(noise, vibration, harshness)水平上。其中,关门声品质极大地影响了人们在选购汽车时的主观感受,逐渐成为近几年汽车NVH研究的热点,也越来越成为评价一个汽车品牌的重要因素之一^[1-2]。

良好的车门声品质可以向顾客传递出车辆的可靠性、舒适性和豪华感等诸多信息,能在很大程度上影响消费者的购车情绪^[3]。通常用户期望的关门声具有如下特点:1)声响适中,有较强的关闭信心感;2)整体感较强、无松散感、无异音;3)厚重,最好能给人一种豪华的感受。因此,本文针对某乘用车关门声品质不达标的问题,利用主观评价和客观测试相结合的方式,采用独立运行法来对样车关门声品质进行优化设计。

1 关门声品质的评价

1.1 客观评价

关门声品质的客观评价指标通常有响度、尖锐度、颤颤、声音清晰度等,但有大量文献表明,其中响度和尖锐度能表征关门声品质的主要内容,故常用其来优化改进对关门声品质的设计^[4]。因此,本文选择响度和尖锐度两个指标对关门声品质进行客观评价。

响度是人对声音大小的一种主观判断^[5]。为了能清楚地描述响度,通常由响度级来定义。而响度级是1000 Hz纯音的声压级,单位为方(Phon)。因此,响度定义如下:以响度级为40 Phon声音的大小,单位为宋(Sone)。其中,响度及其响度级之间的关系如下:

$$N = \sum_0^{24} n'(z) dz \tag{1}$$

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-zdztzxX0047)

第一作者简介:王恒(1992—),男,湖北荆门人,工程师,硕士,研究方向为汽车NVH开发与控制,1017660975@qq.com。

$$N = 2^{\frac{L_N - 40}{10}} \quad (2)$$

式中: N 为响度; $n'(z)$ 为特征响度; z 为临界带宽, Bark; L_N 为响度级。

尖锐度是用于衡量声音信号中高频成分多少的重要心理学参数,主要影响人们对声音音调高低的判断。尖锐度定义如下:以 1 000 Hz 为中心频率的带宽 (<150 Hz) 内,声压级为 60 dB 的窄带噪声,单位为 Acum。通常,尖锐度可表示如下:

$$S_{\text{HARP}} = \frac{\int_0^{24} n'(z) dz}{N} \quad (3)$$

1.2 主观评价

目前,对于汽车关门声品质主观评价的方法主要有:等级评分法、成对比较法、排序法等^[6]。这些方法各有优势,适用于不同的试验条件。因此,在进行主观评价前必须根据声音样本特点,选择恰当的评价方法才能获取良好的评价结果。

等级评分法是根据声音的某个属性,由受过训练的评价者在事先给定的打分制内进行评分,较常用的打分形式是 10 分制标准,如表 1 所示。成对比较法是将两个声音样本按先后顺序进行播放,评价主体每听完一组声音样本后做出判断,主要通过两两比较的方式来对声音进行评价。

表 1 声品质主观评价 10 分制打分标准

等级指数	属性性能评估	满意度	期望改进者
1	极不可接受	非常不满意	所有顾客
2	不可接受	非常不满意	所有顾客
3	差	非常不满意	所有顾客
4	差	不满意	大多数顾客
5	及格	有点不满意	大多数顾客
6	可接受	比较满意	挑剔的顾客
7	可以	比较满意	挑剔的顾客
8	好	好	专业人员
9	很好	很好	专业人员
10	很出色	很出色	无

等级评分法是一种绝对评价方法,当样本较多时,由于缺乏标准的参考,因而难以给出精确的分值,某些声音样本在主观听觉上可能差别很小,难以分辨。成对比较法相对来说比较容易把握,因此本文对于所采集关门声样本信号的声品质主观评价试验采用等级评分法进行,并利用成对比较法对等级评价的结果进行补充和可置信度检验。主观评价流程如图 1 所示。

主观评价在声品质主观评价间进行。参与主观评价试验的评价人员由企业 NVH 工程师和车辆工程专业实习生组成,共计 24 名评价人员。其中男性 18 人,女性 6 人,且都是身体健康,听力正常,具有相关声品质评价经验。在主观评价试验之前,对所有参评者进行样本说明和听音培训。

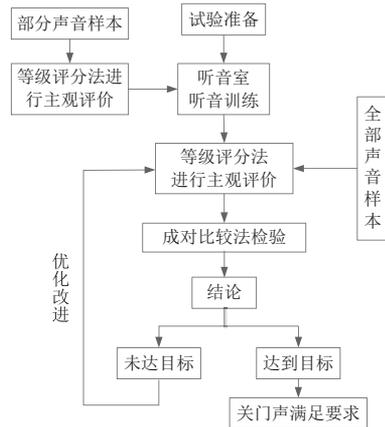


图 1 主观评价流程图

通过前期对样车关门声进行摸底试验,发现样车存在如下问题:样车车门锁撞击声明显,总体响度偏大,车门声音松散,无厚重感,相对对标车有明显差距。

2 关门声品质测试

关门声样本的正确采集是进行关门声品质评价的前提。在背景噪声 <20 dB(A)、截止频率 <50 Hz 的半消声室内布置传感器进行关门声品质测试。测点布置为每个车门把手后方的 400 mm、车身外廓 300 mm 处。传声器的高度为 1.60 m。现场布置如图 2 所示。



图 2 关门声品质测试

选取 3 台样车,对其前、后门分别进行关门声品质试验测试,采集其前、后门的关门声样本并进行预处理。关车门的操作由试验人员完成,使用正常的力度开启并关闭车门。通过关门速度计读取关门速度,保证车门的关闭速度在 1.0~1.2 m/s 之间。在车门的关闭过程中采集各个测点的噪声信号,采样频率不低于 20 480 Hz。连续测试 3 次,且 3 次的测试结果误差不能大于 2 dB(A),否则重测。图 3、图 4 分别为样车原始状态前、后门关门声信号时频图。

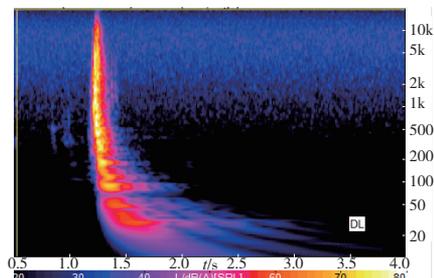


图 3 原状态前门关闭声时频图

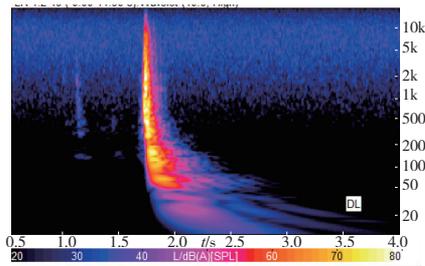


图4 原状态后门关闭声时频图

从图3、图4可知:原状态样车前、后门的高频成分均比较大,尖锐度偏高,说明车门锁较差;前、后门的中频成分较大,密封条吸声能量较少;低频成分适中,没有振颤尾音。

3 优化措施及效果验证

3.1 优化措施

在测试样车初始状态关门声品质的基础上,变更影响车门声品质的主要部件,采用独立运行法,在相同环境下对比不同部件变更后的效果。

1) 方案1:变更车门锁

汽车车门在开启、关闭过程中,车门锁部件会由于受到撞击等产生大量噪声,特别是旋转卡板和棘爪的碰撞更是高频噪声的主要来源^[7]。通过对试验样车门锁系统结构分析发现,门锁部件结构简单,无缓冲吸能装置对撞击能量进行吸收和衰减。因此,要求供应商提供了另外一种缓冲状态的锁,增加了锁口泡棉。图5是车门锁变更前后对比,表2为车门锁变更前后客观评价参数值。

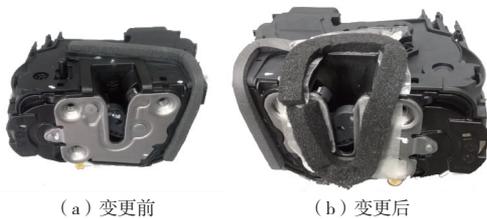


图5 车门锁变更前后对比

表2 车门锁变更前后客观评价参数值

评价指标	变更前	变更后	改善量
响度/Sone	32.02	30.87	1.15
尖锐度/Acum	2.48	2.19	0.29

通过表2可知:车门锁变更后,关门声响度和尖锐度分别降低了3.6%和11.7%,尖锐度改善效果明显,从而进一步验证了车门锁部件主要影响关门声品质的高频成分。

2) 方案2:增加车身密封条

车门密封性是感知整车品质的重要方面,涉及关门声品质、防水防尘、隔音等诸多内容^[8]。通过对样车进行测试分析发现,车门密封性不佳。进一步分析发现,样车车身密封条采用的是单层橡胶密封,且车门内饰板也只做了

简单的吸声和隔振处理。因此,有必要对车身密封条进行改进。在原有的密封条基础上增加一圈手工制作密封条,图6为密封条变更前后对比,其中图6(b)右下角为手工断面。表3为密封条变更前后客观评价参数值。



(a) 变更前

(b) 变更后

图6 密封条变更前后对比

表3 密封条变更前后客观评价参数值

评价指标	变更前	变更后	改善量
响度/Sone	38.39	34.61	3.78
尖锐度/Acum	2.54	2.43	0.11

通过表3可知:车身密封条改进后,响度和尖锐度分别降低了9.8%和4.3%,响度改善效果显著,说明车身密封条主要影响关门声品质的响度。

3) 方案3:改进内饰板

由前面分析发现,样车车门内饰板声学包装材料 and 结构过于简单,不能较好地吸收和隔离关门噪声。经过对样车车门进行分析后,在车门内饰板一圈增加局部泡棉,边缘增加吸声棉,如图7所示。表4为内饰板变更前后客观评价参数值。



图7 内饰板变更

表4 内饰板变更前后客观评价参数值

评价指标	变更前	变更后	改善量
响度/Sone	38.51	37.57	0.94
尖锐度/Acum	2.54	2.51	0.03

通过表4可知:内饰板增加吸声棉后,响度和尖锐度分别降低了2.4%和1.2%,但效果均不是很明显,说明通过改进内饰板来提高关门声品质的效果有限。

4) 方案4:增加阻尼胶片

阻尼胶片充分利用了高分子聚合物的大阻尼特性和钢板的高刚度优势,从而实现了对车身的振动和噪声控制^[9]。此外,阻尼胶片具有易粘贴、质量轻和可裁剪成任意形状等诸多优点,在车身NVH开发过程中得到了广泛应用。为验证阻尼胶片对关门声品质的影响,在原车的基础上逐步增加阻尼胶片进行试验,从而确认阻尼胶片对声品质的贡献

量。图 8 所示为阻尼胶片在样车上应用的 3 种状态,图 9 为试验测得的阻尼胶片对车门声品质的贡献量。



图 8 阻尼胶片变更状态

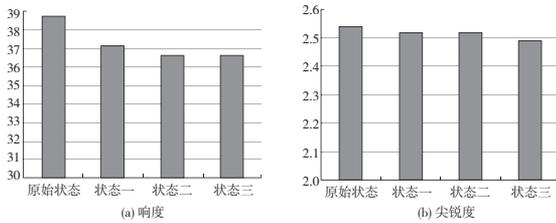


图 9 阻尼胶片对车门声品质的贡献量

从图 9 可知:相比于未贴阻尼胶片时,在车门不同位置张贴阻尼胶片后,3 种状态下响度分别为下降了 1.62 Sone、下降了 2.14 Sone、基本不变;尖锐度分别为下降了 0.02 Acum、不变、下降了 0.03 Acum。由此可知,张贴阻尼胶片对关门声品质响度改善效果明显,对尖锐度改善效果并不明显。

5) 各方案贡献量总结

将各改进方案对车门声品质的影响进行汇总,如表 5 所示。从表 5 可知,对响度贡献量从大到小依次为密封条、阻尼片、车门锁及吸声棉;对尖锐度贡献量从大到小依次为车门锁、密封条、阻尼胶片及吸声棉。

表 5 各方案贡献量对比

评价指标	车门锁	密封条	阻尼胶片	吸声棉
响度/Sone	1.15	3.78	2.14	0.94
尖锐度/Acum	0.29	0.11	0.03	0.03

3.2 整改方案验证

经过多轮优化方案的实施发现,单独采用上述某一种或某两种改进方案,样车关门声品质均不能超越对标车。因此,为了样车关门声品质能达到以及超越对标车,最终将 4 种改进方案集成到一起进行试验。图 10、图 11 分别为最终方案测得的前、后门关门声信号的时频图,表 6 为对标车和优化后样车的客观测试结果。

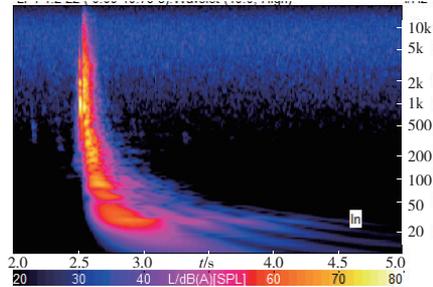


图 10 优化后前门关闭声时频图

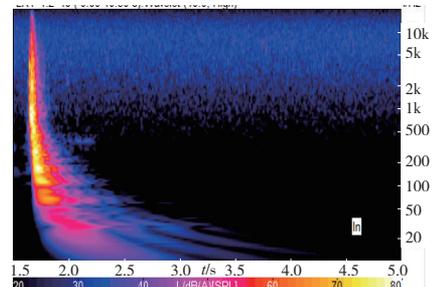


图 11 优化后后门关闭声时频图

对比图 3、图 4 和图 10、图 11 的优化前后样车前、后门关闭声时频图可知,优化后前门的高频成分和中频成分明显下降,尖锐度降低,密封条吸声能量增加;优化后后门的高频成分明显下降,尖锐度降低。从表 6 可知,样车最终优化方案的关门声品质客观测试结果均优于对标车。

表 6 样车和对标车客观评价参数值

测试工况	对标车				样车(优化后)				
	左前门		左后门		左前门		左后门		
	车外	车内	车外	车内	车外	车内	车外	车内	
响度	Run1	47.49	53.89	44.15	64.51	30.68	42.22	34.81	50.59
	Run2	49.63	54.25	48.36	66.02	30.93	42.00	34.82	50.96
	Run3	49.17	55.44	45.57	64.52	31.31	41.64	35.41	51.20
	平均	49.40	54.53	46.03	65.02	30.97	41.95	35.01	50.92
尖锐度	Run1	2.59	3.00	2.32	3.01	2.17	2.61	2.09	3.01
	Run2	2.63	3.03	2.31	3.01	2.25	2.65	2.12	3.03
	Run3	2.65	3.05	2.30	2.98	2.17	2.60	2.15	3.04
	平均	2.64	3.03	2.31	3.00	2.20	2.62	2.12	3.03

(下转第 225 页)

3 结语

装配序列在飞机制造时非常重要,属于决定飞机制造质量的关键因素,优化装配序列能获得更为合理的装配序列,可加快飞机制造效率,提升飞机质量。为此研究改进遗传算法的飞机结构件装配序列优化方法,可获得最佳的装配序列,提升飞机结构件装配方向一致性与装配聚合性等,提高飞机装配效率,为飞机制造领域提供更好的服务。

参考文献:

- [1] 张秋月, 安鲁陵, 岳炬德, 等. 基于遗传算法的飞机复合材料结构装配压力大小与布局的优化[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1546-1557.
- [2] 朱永国, 邓斌, 霍正书, 等. 小样本检测数据驱动的飞机结构件装配关键偏差源诊断[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22): 2725-2733.
- [3] 王华敏, 秦国华, 胡政, 等. 面向加工变形控制的航空整体结构件拓扑优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 127-138.
- [4] 侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 981-989.
- [5] 刘殷杰, 田锡天, 耿俊浩, 等. 飞机薄壁零件装配偏差建模与仿真分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(2): 138-143.

- [6] 吴国祥, 胡晓宇. 基于模因算法的飞机装配序列规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 288-296.
- [7] 刘晓阳, 刘恩福, 靳江艳. 基于蚁群算法的异步并行装配序列规划方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 107-119.
- [8] 刘振鹏, 王雪峰, 薛雷, 等. 实数编码遗传算法的改进及并行化实现[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 86-92.
- [9] 罗建军, 王嘉文, 王明明, 等. 机器人在轨构建空间桁架结构的装配序列规划方法[J]. 宇航学报, 2021, 42(4): 437-449.
- [10] 白利征, 阎鑫, 齐少璞, 等. 基于几何推理有向图的装配序列规划[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 72-76.
- [11] 赵海鸣, 蔡进雄, 付彪, 等. RV-E 减速器的装配序列规划研究[J]. 机械传动, 2019, 43(9): 1-8.
- [12] 李爱平, 赵亚西, 张家骅, 等. 考虑装配关系复杂性的多目标装配线平衡优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1665-1675.
- [13] 李思良, 袁庆霓, 胡淞, 等. 复杂装配体多层次装配路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3): 178-182, 242.
- [14] 梁利东, 贾文友, 江本亦, 等. 定位关系在装配序列规划中的应用研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(5): 762-768.
- [15] 王鹏, 杨明亮, 李哲人, 等. 基于改进遗传算法的TMD阻尼器的优化布置[J]. 机床与液压, 2019, 47(16): 17-21, 29.

收稿日期: 2022-05-04

(上接第 206 页)

3.3 主观评价

为进一步验证优化后样车客观测试结果的准确性,对优化前后声音样本进行了主观评价。运用上述介绍的等级评分法对采集到的关门声样本进行主观评价,采用如表 1 所示的 10 分制打分标准,根据总体响度、尖锐度、振颤、突出感、豪华感、低廉等特征进行主观评价。最后,通过对 24 个评价结果进行成对比较法检验,剔除 2 个不合格的评分后,对余下 22 个评价者的打分进行求和取平均,计算得到的优化前后主观评价价值如表 7 所示。结果表明优化后比优化前提高了 31.9%, 满足要求。

表 7 优化前后主观评价价值

主观评价价值	优化前	优化后	改善量
分值	5.98	7.89	1.91

4 结语

针对某自主品牌乘用车关门声品质较差的问题,结合主观评价,对样车开展客观测试和优化设计,使得优化后的样车关门声品质优于对标车。结果表明:在声品质主观评价中先采用等级评分法进行打分,然后利用成对比较法对等级评分法的结果进行验证,可剔除掉不可靠的个体,使得主观评价结果更具可靠性。通过独立运行法能在车门声品质开发中快速分析出不同措施对声品质的贡献量

大小,具有可操作性强、便于工程化应用的特点。在车门声品质开发中,采用主客观评价相结合的方式,可以快速准确地诊断出问题所在,对于改善车门声品质和提高工作效率均具有显著的优势。

参考文献:

- [1] LEE S K. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 310(1/2): 149-168.
- [2] 田玉珠, 李洪亮, 苏丽俐, 等. 应用声学定位技术对汽车关门声品质的改进设计[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(13): 286-290.
- [3] 谢明睿, 刘海红, 吴澍平, 等. 某 SUV 车门关门声品质建模及优化[J]. 应用声学, 2017, 36(6): 490-496.
- [4] 张守元, 李玉军, 杨良会. 某电动汽车车内噪声改进与声品质提升[J]. 汽车工程, 2016, 38(10): 1245-1251.
- [5] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [6] 刘哲, 高云凯, 解馥荣. 电动汽车关门声品质预测模型研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(12): 1858-1864.
- [7] 李占营. 门锁系统的优化设计及其对车辆声品质的影响[J]. 汽车技术, 2016(3): 13-17.
- [8] 胡远志, 雷雨, 郑光泽, 等. 车身密封性对车内噪声的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(9): 1-6.
- [9] 刘强, 岳洋, 马芳武, 等. 汽车声学封装材料性能与应用效果研究[J]. 功能材料, 2012, 43(增刊 1): 73-77.

收稿日期: 2022-06-24