

◇ 研究报告 ◇

某SUV车门关门声品质建模及优化

谢明睿 刘海红[†] 吴澍平 丁志勇 陈清爽 张小红

(江铃汽车股份有限公司 江西省汽车噪声与振动重点实验室 南昌 330031)

摘要 本文介绍了汽车关门声品质的客观评价方法和评价参数以及关门声品质影响因素等方面的研究现状。在此基础上,针对某SUV车型车门关门声音的响度和尖锐度偏大的问题,进行了关门声的客观测试和特性分析,结合正交实验设计,建立关门声品质优化模型,针对关门声音振颤的问题,结合CAE分析,确定了车门外板高灵敏度区域,并对该区域进行了吸振处理,措施实施后关门声音的响度、尖锐度以及振颤均达到了更好的水平,且关门声主观评价也有明显提升。

关键词 关门声品质,响度,尖锐度,振颤,优化

中图分类号: U463.83

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2017)06-0490-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.003

The analysis and optimization of closing sound quality in a SUV door

XIE Mingrui LIU Haihong WU Shuping DING Zhiyong
CHEN Qingshuang ZHANG Xiaohong

(Key Laboratory of Vehicle Noise and Vibration, Jiangling Motors Company, Nanchang 330031, China)

Abstract Objective methods of evaluating door closing sound quality and assessment parameters were introduced in this paper. Main elements that related to door closing sound quality were listed. According to objective tests, orthogonal experiments were designed to choose the best group of lock structures which has the lowest loudness and sharpness. In order to optimize the ring-down time, damper was added on the modal sensitive area of the outer metal plate of the door, referencing the results of CAE calculation, to absolve the door's vibration. The door closing sound quality has been optimized significantly, while the values of loudness, sharpness and ring-down time are rated to a better level. The score of subjective evaluation is improved 0.75 of the front door and 1.09 of the rear door.

Key words Door closing sound quality, Loudness, Sharpness, Ring-down, Optimization

2017-03-08 收稿; 2017-08-01 定稿

作者简介: 谢明睿 (1987-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 研究方向: 噪声、振动与声振粗糙度研究。

[†] 通讯作者 E-mail: hliu34@jmc.com.cn

1 引言

较好的关门声品质能够传递出车辆的安全性、舒适性、可靠性、豪华性,影响消费者的选择心理,特别是乘用车和豪华品牌车型。众多车企及研究机构均对关门声品质的评价方法、影响因素进行了大量的研究,以提升车辆的品质感。国内关于关门声品质的研究主要集中在以下几个方面:(1)建立主观评价体系,提高关门声品质的分析及控制效率^[1],该研究可提升关门声品质判定效率;(2)在传统的关门声品质客观评价参数的基础上,提出新的客观评价参数,提高主观评价与客观评价相关性^[2-4],这类研究旨在提供更为有效的客观评价指标,但此类算法仍待完善和推广;(3)建立关门声品质预测模型,在设计阶段对关门声品质进行控制^[5]。在上述分析的基础上,从车身子系统如密封条、门锁、锁扣以及车门结构等方面进行优化,提升关门声品质^[6-9]。

本文介绍了关门声品质的客观评价方法与评价参数、影响关门声品质的主要因素。针对某SUV车门关门声品质较差的问题,通过改善门锁和锁扣结构、改善车门外板刚度等方面优化了车门关门声品质。

2 关门声品质评价参数

参考国内外相关文献,关门声品质的主要客观评价标准为关门声音的尖锐度、振颤以及响度,同时还会参考波动度和粗糙度。

尖锐度(Sharpness)是衡量声音中高频成分多少的心理学指标,其单位为acum。振颤(Ring-down)是指两个物体碰撞后产生的声音以及余音的持续时间,单位为ms。响度(Loudness)是人耳对声音大小的主观感觉指标,其单位为sone,1sone是指1kHz纯音,声压级为40dB时的响度。波动度(Fluctuation)和粗糙度(Roughness)均为调制度,即两个不同幅值、不同频率的波叠加后的效果。当调制频率在0.5~20Hz时,调制度为波动度其单位为vacil,当调制频率在20~300Hz时,调制度为粗糙度,其单位为asper。

此外,国内外还有很多有关关门声品质客观评价参数的研究。蔺磊等^[2]在尖锐度随时间的变化曲线的基础上,提出了新的评价指标尖锐度溢

值;杨川等^[3]通过计算采集到的汽车关门声信号的伪WINGE-VILLE分布,并对WINGE-VILLE分布的分布系数进行数值处理,得到声品质评价参数(Sound metric based on pseudo WIGNER-VILLE distribution, SMPWVD);赵丽路等^[4]通过对汽车关门声音信号进行EMD分解和Hilbert变换,根据瞬时频率对IMF分量进行临界频率带计权并计算能量得到新的关门声品质评价参数(Sound metric based on Hilbert-Huang transform, SMHHT)。上述几种新的关门声品质客观评价参数均是在传统客观评价参数的基础上延伸的,有一定的优点,但算法需完善和推广。

3 关门声品质的影响因素及优化方法

3.1 影响因素

在关门过程中,声源主要包括车门与车身的碰撞声、门锁的碰撞声以及车门内外板的噪声辐射,主要影响因素包括车门内外板的结构、车门刚度、锁体和卡板结构、密封条的压紧力以及防撞块,门锁扣车身安装面板刚度等。车身与车门的碰撞是密封条之间的碰撞,以及车门与防撞块的碰撞,声音中低频成分较多,是响度的主要贡献者;门锁碰撞声包括低频和高频成分,其中低频噪声小于车身与车门的碰撞所产生的低频噪声,所以对响度影响较小,而对尖锐度影响很大,相关文献指出,关门噪声中的尖锐度50%以上是由门锁碰撞产生的;车门板的辐射噪声由机械共振引起,以中频为主,是振颤的主要贡献者^[10-12]。

3.2 优化方法

提升关门声品质通常是通过降低尖锐度、减少振颤以及降低响度来实现的。降低尖锐度的途径通常包括改进和加强门锁、锁扣,以及改进密封条的结构,降低防撞块的硬度以及抑制车门外板的振动辐射^[8-9];减少振颤的方式主要有改变车门密封胶密封方式,改进车门外板的结构和刚度,包括增加防撞梁、增加补强胶或者贴阻尼以及改进车门内板、内饰板和冲压面板的刚度等^[5,10];降低响度的方法主要是改进车门的几何结构,改变车门内板、车门内饰板和冲压面板的刚度,以及加强门锁和锁扣的刚度。

就提升车门关门声品质,杨川等^[3]利用减小模态能量的方法降低关门声音的响度与尖锐度,进而提高关门声品质;蔺磊等^[6]通过改进锁体,并在后侧围钣金增加加强阻尼的方案,降低了关门声的响度和尖锐度。郭冬梅等^[7]通过增加车门上门框刚度以及调节车门与车身之间的间隙,提高关门声品质。李占营^[8]较详细的分析了门锁系统中各接触部件(如锁扣和旋转卡板)之间的缓冲设计,以及锁扣的安装点刚度的设计优化等。陈缓等^[9]调整了缓冲块的硬度以及安装干涉量以提高开关门声品质。

4 车门关门声品质优化案例

为了使某SUV车型的关门声品质达到一个高级乘用车的水平,对该样车进行了关门声信号采集、关门声信号处理,分析了关门声信号的频谱特性;针对影响关门声品质的相关影响因素进行了优化。

4.1 关门声采样

在半消音室内利用Head双耳人工头采集器对该SUV的前门、后门关门声进行采样。车外人工头的摆放位置如下:人工头高度为171.5 cm,头部鼻尖位置距离门把手中心外侧30 cm,头部鼻尖位置在门把手后端40 cm,肩部与车身平行,如图1所示。



图1 采样位置

Fig. 1 Test location

车辆关门声采样通常进行等关门速度采样和等关门力采样^[6]。为了提高关门声的一致性,本文采用等关门力关门获取关门声音信息。关门力设置为能将测试样车的前门和后门都关上的最小关门

力。关门采用关门力控制设备,该设备可以显示关门力,便于控制。

因关门声是瞬态冲击信号,所以采集关门声信息的时候采用多次采样,并将采样结果进行平均处理的方法。

4.2 客观评价参数选择

本文采集5台不同型号样车的前、后门共10个关门信号,并在听音室回放,组织20个人(2个受过专业训练的NVH工程师、2个NVH工程师以及16个没有NVH经验的产品工程师)对关门声样本进行主观打分(10分制,6分可接受)。参考文献[13]和文献[14],利用三角循环误判方法,剔除计权一致性系数较低的两个评价人员的评价数据(84.34%和76.96%),保留的评价人员的评价数据计权一致性系数均在85%以上,得出5台样车10个关门声信号的主观偏好性。

利用ArtmiS Classic软件计算出各关门声音信号的尖锐度、响度、粗糙度、波动度,并参考文献[12]计算出各声音信号的振颤时间。利用统计软件计算主观偏好性和上述参数的相关性,结果表明,主观偏好性与尖锐度($R = 0.98$)和响度($R = 0.97$)相关性最大,振颤($R = 0.82$)比粗糙度($R = 0.63$)对偏好性的影响显著。故本文对关门声品质的客观评价参数选择尖锐度、响度和振颤。

4.3 关门声信号处理

以主观偏好性居中的样车前门和后门关门声信号为例,其时间-频谱图和声压曲线如图2所示。

通过图2可以看出,前门关门声品质优于后门,声压较后门小,且振颤时间短,但前门后门均存在关门声不纯粹的现象,在主关门声之前,还存在高频的噪声。表1为前后门关门声音的响度、尖锐度、和振颤。

表1 关门声的尖锐度、振颤和响度

Table 1 Sharpness, ring-down time, and loudness of door closing sound

位置	尖锐度(acum)	振颤(ms)	响度(sones)
前门	3.5	616	42
后门	3.9	722	45

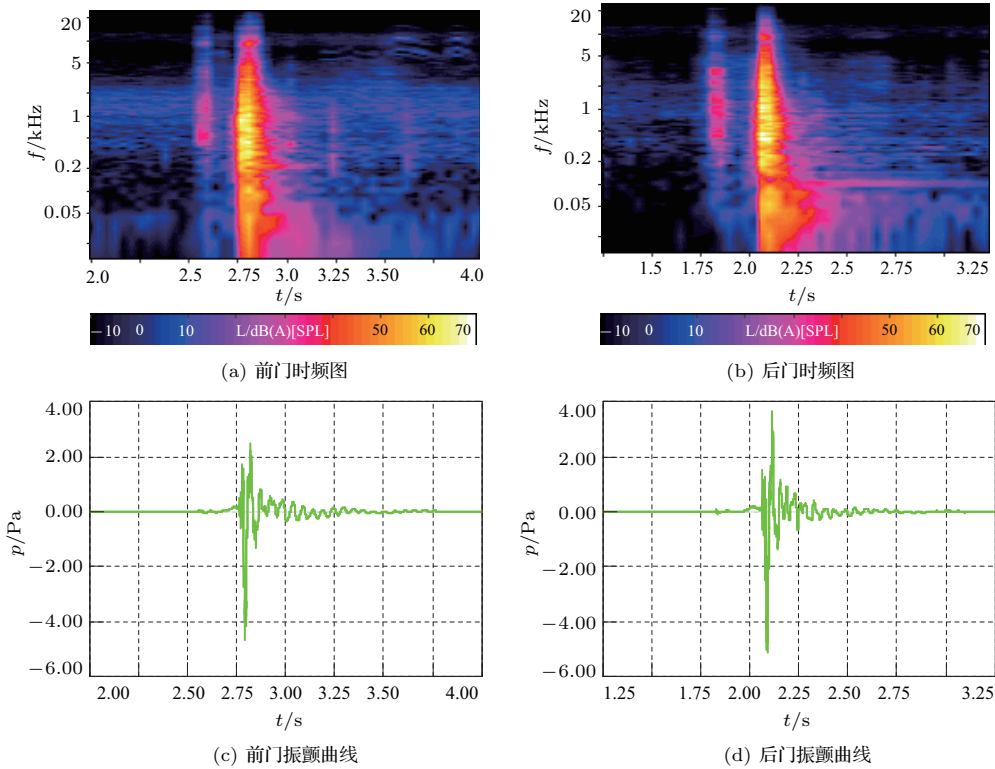


图2 关门声时频图和振颤曲线

Fig. 2 Time-frequency figures and ring-down curves of door closing sound

通常,在最小关门力情况下,高端乘用车的车门关门声品质对应的响度应低于40 sone,尖锐度应小于3.2 acum,振颤即低频噪声的持续时间应在400~500 ms,高频噪声(2 kHz以上)的持续时间应最小化^[10-12]。该样车的前门、后门关门声品质均有优化的空间。

4.4 关门声品质优化方案

将采集到的关门声信号在听音室回放,组织相关工程师对关门声进行识别,多次回放之后,识别出了门锁与锁扣碰撞声音、锁体内部棘轮棘爪回位声音以及空腔回音。

(1) 门锁与锁扣碰撞声音、锁体内部棘轮棘爪回位声音主要影响关门声的响度和尖锐度,可通过改善锁体结构改善关门声品质,对本样车锁体结构进行分析,影响关门声品质的因素主要有门锁棘轮的消音槽A,锁扣缓冲块的硬度B和厚度C,锁扣和缓冲块的干涉量D,棘轮和锁扣的配合过盈量E。对上述5个影响因素的4个水平,进行正交实验设计,正交表为 $L_{16}(4^5)$,如表2所示。

参照表2对16种组合进行实验,根据实验结果以单一参数为自变量,响度和尖锐度为因变量,其余

参数保持当前值,拟合单一参数和声品质的函数,在此基础上进行多元参数回归分析,预测上述5个参

表2 正交实验表

Table 2 List of orthogonal experiments

实验号	影响因素				
	消音槽	锁扣缓冲块的硬度	锁扣缓冲块的厚度	锁扣和缓冲块的干涉量	棘轮和锁扣的配合过盈量
1	A1	B1	C1	D1	E1
2	A1	B2	C2	D2	E2
3	A1	B3	C3	D3	E3
4	A1	B4	C4	D4	E4
5	A2	B1	C2	D3	E4
6	A2	B2	C1	D4	E3
7	A2	B3	C4	D1	E2
8	A2	B4	C3	D2	E1
9	A3	B1	C3	D4	E2
10	A3	B2	C1	D3	E1
11	A3	B3	C4	D2	E4
12	A3	B4	C2	D1	E3
13	A4	B1	C4	D2	E3
14	A4	B2	C3	D1	E4
15	A4	B3	C2	D4	E1
16	A4	B4	C1	D3	E2

数和声品质对应的函数。根据预测函数计算出声品质最优的参数组合,并补充该参数组合下的实验,实验结果显示,响度和尖锐度与函数预测结果的相对误差分别为7.74%和8.33%。最优参数组合方案如下:门锁棘轮的消音槽由盲孔改为通孔,降低锁扣缓冲块的硬度,增加缓冲块的厚度,增加锁扣和缓冲块的干涉量,同时降低棘轮和锁扣的配合过盈量。图3为改善后的门锁棘轮。

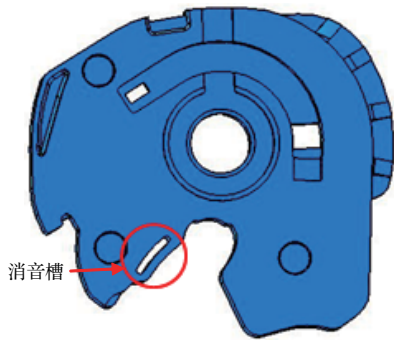


图3 门锁棘轮示意图

Fig. 3 Structure of latch

(2) 空腔回音主要影响关门声的振颤,可通过改善车门内外板的结构和刚度来降低振颤。本文利用CAE对后门进行模态分析,寻找后门面板灵敏度高的区域,并对之进行吸振处理。建立后门CAE模型,模型信息及材料信息如表3、表4所示。

表3 样车后门CAE模型

Table 3 CAE model of rear door

CAE模型	模型重量(kg)	节点数	单元数
样车后门	23.97	61247	59128

表4 样车后门CAE材料信息

Table 4 Materials of rear door CAE model

材料	类型	弹性模量(E)	泊松比(Nu)	密度(ton/mm ³)
钣金	MAT1	2.1×10^5	0.3	7.8×10^{-9}
密封胶	MAT2	15	0.42	1.4×10^{-9}

对后门进行约束模态分析,得出后门外板的灵敏度高的区域如图4所示。针对图4中灵敏度高的区域,在钣金的外侧增加阻尼片降低钣金振幅进行验证,如图5所示。

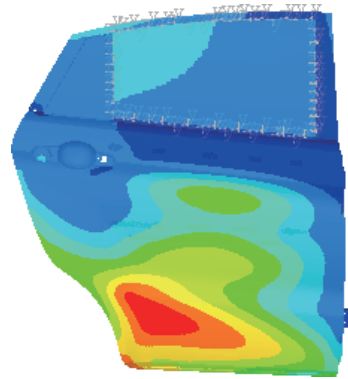


图4 后门外板模态分析结果

Fig. 4 Modal analysis results of rear door outer frame



图5 后门外板灵敏度高的区域贴阻尼片

Fig. 5 Add mastic to modal sensitive area

4.5 优化效果

(1) 客观方面,针对前后门门锁及锁扣优化、后门外板模态薄弱区域贴阻尼之后,样车前门、后门关门声音的时间-频谱图和振颤曲线如图6所示,响度、尖锐度、振颤如表5所示。与优化之前关门声信号相比,样车前门及后门主关门声之前的高频噪声基本消失,关门声压降低,振颤时间减少;前门、后门的关门声品质的评价参数尖锐度、振颤和响度均已达到高端乘用车水平,即尖锐度小于3.2 acum,振颤即低频噪声的持续时间在400~500 ms内,响度低于40 sone。

表5 优化后前后门关门声音的尖锐度、振颤和响度

Table 5 Sharpness, ring-down time, and loudness of door closing sound after optimization

位置	尖锐度(acum)	振颤(ms)	响度(sone)
前门	2.7	421	37.3
后门	2.9	473	39.1

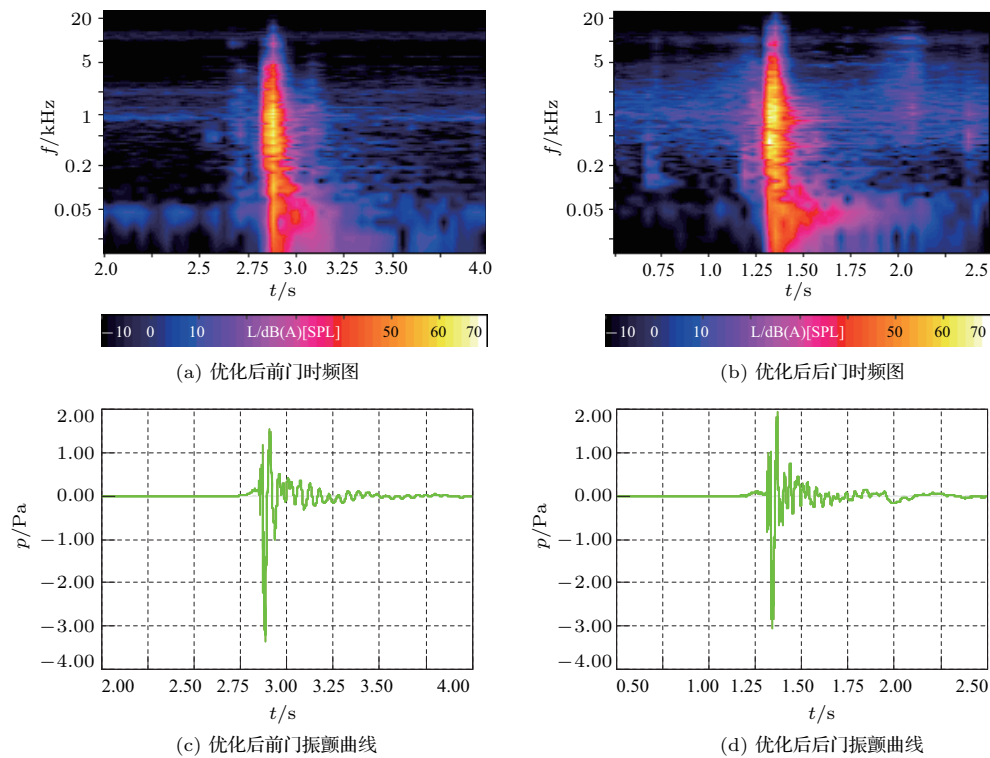


图6 优化后关门声时频图和振颤曲线

Fig. 6 Time-frequency figures and ring-down curves of door closing sound after optimization

(2) 主观方面,选取同型号样车5台,分别采集改善前后样车前门、后门关门声信号,并分别对前门、后门关门声信号随机编号,组织12人分2组对前门、后门关门声信号进行主观打分(10分制,6分可接受),对打分结果进行分析,优化后,前门关门声品质主观打分平均提高0.75,后门关门声品质主观打分平均提高1.09,优化效果明显,与客观数据一致。

5 结论

本文对国内对关门声品质的常用客观评价和分析方法进行了阐述,针对不同的评价参数,介绍了车门子系统的主要结构及其对声品质评价参数的影响。对某SUV车型声品质优化的需求,用Head人工头采集器对关门声进行采集,并分析数据,通过正交实验设计,提出了门锁结构的优化方案,结合模态仿真分析结果,提出了车门面板优方案。优化后该样车的前门及后门关门声品质均已达到较高水平,尖锐度小于3.2 acum,振颤即低频噪声的持续时间在400~500 ms内,响度低于40 sone。同时,5台样车前门及后门优化前后的声信号进行了主观

打分分别提升了0.75和1.09分,与客观分析结果一致。对同类车型的关门声品质的测试,评价和优化提升,具有一定的借鉴和指导意义。

参 考 文 献

- [1] 陈德欣,曹友强,王勇,等. 车门关门声品质控制的主观评价体系研究[J]. 现代制造工程, 2014(12): 30-36.
CHEN Dexin, CAO Youqiang, WANG Yong, et al. Study on subjective evaluation system of vehicle door closure sound quality[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(12): 30-36.
- [2] 蔺磊,顾彦,蔺玉辉,等. 车辆关门声品质评价方法的研究[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(2): 129-133.
LIN Lei, GU Yan, LIN Yuhui, et al. Study on the sound quality evaluation of the automobile door closure[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2012, 2(2): 129-133.
- [3] 杨川,于德介. 汽车关门声品质改进方法的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(8): 686-691.
YANG Chuan, YU Dejie. An investigation into the technique for improving the sound quality of vehicle door slamming[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(8): 686-691.
- [4] 赵丽路,于德介,陈关宝. 汽车关门声品质评价参数的建立[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(3): 132-137.
ZHAO Lili, YU Dejie, CHEN Guanbao. A matrix for

- sound quality evaluation of car's door-slammings[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(3): 132-137.
- [5] 张波, 毕传兴, 徐亮. 基于人工神经网络模型的车门关闭声品质评价方法研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(11): 1003-1006.
ZHANG Bo, BI Chuanxing, XU Liang. A study on the evaluation method of vehicle door closing sound quality based on artificial neural network model[J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(11): 1003-1006.
- [6] 蔺磊, 顾彦, 蔺玉辉, 等. 车辆关门声品质的优化研究[J]. *北京汽车*, 2012(3): 35-39.
- [7] 郭冬梅, 马芳武, 刘强, 等. 汽车开关门声品质的评价与改善措施的研究[C]//中国汽车工程学会年会论文集, 长春, 2010: 832-835.
- [8] 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.
LI Zhanying. Optimization design of door lock system and its influence on sound quality of vehicle[J]. *Automobile Technology*, 2016(3): 13-17.
- [9] 陈缓, 邓智伟, 刘立群, 等. 车门开闭感评价与优化[J]. *汽车技术*, 2014(8): 13-15, 19.
CHEN Huan, DENG Zhiwei, LIU Liqun, et al. Evaluation and optimization of vehicle door opening and closing feel[J]. *Automobile Technology*, 2014(8): 13-15, 19.
- [10] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [11] PETNIUNAS A, OTTO N C, AMMAN S, et al. Door system design for improved closuresound quality[J]. SAE Technical Paper, 1999-01-1681.
- [12] HAMILTON D. Sound quality of impulsive noises: An applied study of automotive door closing sounds[J]. SAE Paper, 1999-01-1684.
- [13] 钟秤平, 陈剑, 汪念平. 车内噪声声品质偏好性评价与分析实验研究[J]. *汽车工程*, 2008(1): 40-43.
ZHONG Chengping, CHEN Jian, WANG Nianping. An experimental evaluation and analysis on sound quality preference for in-car noise[J]. *Automotive Engineering*, 2008(1): 40-43.
- [14] 毛东兴, 俞悟周, 王佐民. 声品质成对比较主观评价的数据检验及判据[J]. *声学学报*, 2005, 30(5): 468-472.
MAO Dongxing, YU Wuzhou, WANG Zuomin. Statistical validation and criterion for paired comparison data in sound quality evaluation[J]. *Acta Acustica*, 2005, 30(5): 468-472.