

轿车车内噪声品质偏好性评价方法的研究

赵彤航¹, 卢炳武¹, 姜文君¹, 孙强², 梁杰²

(1. 中国第一汽车股份有限公司汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室, 130011, 长春;
2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 130061, 长春)

摘要: 针对汽车噪声品质主观评价所需周期长、可重复性差且仅能比较出具有较明显差别的噪声样本等问题,在研究声品质客观量化的基础上,提出了一种以心理声学客观参数来描述噪声主观评价结果的计算方法.以 6 辆同类轿车匀速行驶时的车内噪声样本为评价对象,采用成对比较法进行声品质主观评价,计算各噪声样本的主要心理声学客观参数,通过多元线性回归分析,建立了声品质偏好性主观评价客观量化的数学模型.模型结果表明,相对于噪声分析中常用的 A 计权声压级和线性声压级,心理声学客观参数更适合于描述车内的噪声品质,其中响度和尖锐度是匀速行驶工况下车内声品质的主要影响因素.

关键词: 轿车;车内噪声;品质;偏好性;评价方法

中图分类号: U467.493 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0127-05

Evaluation for Car Interior Noise Quality Preference

ZHAO Tonghang¹, LU Bingwu¹, JIANG Wenjun¹, SUN Qiang², LIANG Jie²

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Technology on Automobile Vibration and Noise & Safety Control, China FAW Ltd., Changchun 130011, China; 2. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: A modeling method by describing sound subjective evaluation with objective psycho-acoustical parameters is proposed to treat with sound subjective evaluation with long period, poor repeatability and quite differently comparable sound samples. The interior noises from six cars at constant driving speed are selected as the evaluation objects. The subjective evaluation test is carried out with the paired comparison, and several primary objective psycho-acoustical parameters of these samples are calculated. Following the multi-dimensional regression analysis, a sound quality subjective evaluation model is developed. The model with psycho-acoustical parameters gets more suitable to describe car interior noise quality than A weighted sound pressure level (SPL) and linear SPL. Loudness and sharpness incarnate the main factors of interior noise quality at constant driving speed.

Keywords: car; interior noise; quality; preference; evaluation method

在传统的汽车车内噪声研究中,大多采用 A 计权声压级 L_A 为评价指标,并致力于使车辆噪声的 A 计权声压级满足日益严格的法规要求.但是,由于对 A 计权声压级的评价没有充分考虑车内噪声的声学特性,因此并不能全面反映声音对人的骚扰性.事实上,由于人的感觉带有很强的主观性,往往会出

现 A 计权声压级测量合格,但乘客却感觉噪声十分烦躁、难以忍受,因此可反映主观感受的声品质^[1-3]即成为评价声音适宜性的主要指标之一.

从评价主体上讲,车内声品质的评价可分为主观评价和客观评价 2 大类.声品质主观评价研究^[4]是采用问卷调查或主观评价试验等形式来描述声品

质的主观感知特征,它反映了听音者对声品质偏好性的一种主观印象,主观评价方法符合人类听音时对声品质的感觉,因此这种评价应是声音品质的真实反映.声品质客观评价研究是建立声品质主观感知属性与物理声学、心理声学之间的联系,从声音信号的时间历程、频谱构成、物理声学参数、心理声学参数和双耳信号的互相关性等多个角度来进行研究.

声品质主观评价符合人对声音品质的感觉,但完成声品质的主观评价,必须征募大量的听音者,并且声品质主观评价经常受到人对声音感知的不可重复性的影响,因此声品质主观评价的稳定性较差,并且仅能够比较出较为明显的参数调整效果.相对而言,声品质的客观评价则是非常方便、快捷的评价方法,其结果不受人员变化的影响,客观评价参数的获取可很容易地实现自动化,但声品质的客观评价参数较多,不同级别车型、不同驾驶工况下的声品质的主要客观评价参数是不同的^[5-8],因此如何选出具有代表性的客观评价参数非常重要.

本文以6辆同级别轿车在匀速行驶工况下的车内噪声样本作为分析对象,对声品质偏好性进行了主观评价试验分析,并对心理声学客观参数进行了计算分析.在此基础上,通过统计学线性回归分析将二者关联起来,从而建立了声品质偏好性数学模型,为车内噪声品质的改善提供了指导依据.

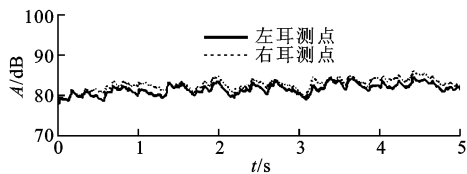
1 噪声样本采集与声品质主观评价

1.1 测试条件与样本采集

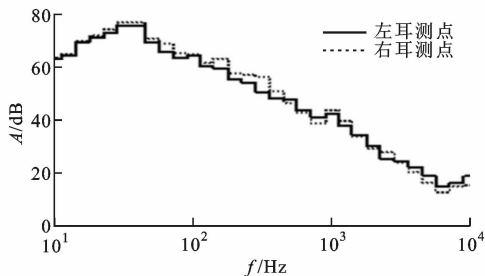
采用德国 Head Acoustics 公司的 HEAD HM-SIII 数字人工头测试系统、BEQ 数据采集分析系统及 HEAD Artemis 软件,记录车内的噪声信号.试验在平直的一级沥青公路上进行,试验样车为6辆同级别的轿车.试验时将人工头布置在副驾驶座位上,样车分别以5种速度匀速行驶.记录各工况下的车内噪声信号,共得到30个噪声样本,并将每个样本的长度截取为5 s,部分样本结果如图1所示.图中为2辆轿车以50 km/h 匀速行驶时,车内噪声样本的时域、频域图.对于图1的数据结果,从汽车噪声信号数据处理的传统方法来看,2辆车的噪声水平相差不大.

1.2 主观评价方法

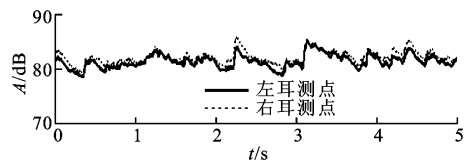
对采集到的噪声样本进行主观评价时,为减少外部环境对评价者的干扰,评价地点应选择专门的音质评价间或静音室.同时,噪声样本回放设备应采



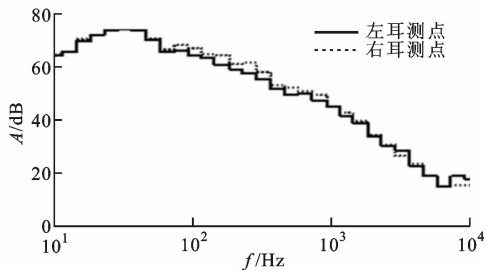
(a) 车辆1的噪声样本时域图



(b) 车辆1的噪声样本频域图



(c) 车辆2的噪声样本时域图



(d) 车辆2的噪声样本频域图

图1 匀速工况下车内噪声样本的时、频域曲线

用具备高保真功效的耳机或音响系统.

关于声品质主观评价方法,常用的有等级评分法和成对比较法,本文采用成对比较法对噪声样本进行主观评价.成对比较法^[9-10]是将各噪声样本按照排列组合的方式自由分组,每组2个噪声样本,试验时依次回放各组噪声样本,评价者根据个人喜好从每组样本中选出认为更优的噪声样本并记录下来,对所有评价者的评价结果进行统计,并计算出样本*i*的声品质偏好性绩效值

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{i \neq j} \ln \left(\frac{P_{ij}}{P_{ji}} \right) \quad (1)$$

$1 \leq j \leq n, i \neq j$

式中: n 为样本总数; P_{ij} 为评价者选择样本的概率; $P_{ji} = 1 - P_{ij}$. M_i 值越大说明评价者对该样本的喜好

程度越高.

1.3 主观评价数据处理

为降低工作量,在进行主观评价之前,利用噪声样本的客观参数值,通过聚类分析法对噪声样本进行分层聚类,最终从 30 个噪声样本中提取出 12 个具有代表性的噪声样本. 主观评价团成员包括汽车振动噪声(NVH)专家、普通工程师、司机及汽车技术工人,共计 32 人,他们对上述聚类分析后的 12 个噪声样本进行了主观评价.

由于评价者的评价结果具有一些差异,通过三角循环误判检验,排除其中具有显著差异的 4 名评价者,然后计算剩余 28 人的 Spearman 相关系数,再次排除其中相关系数较低的 4 名评价者. 通过以上数据检验,共剩余 24 名评价者的数据,从中统计出任意 2 个噪声样本的选择概率 P_{ij} 和 P_{ji} ,由式(1)计算出每个噪声样本的声品质偏好性绩效值,见表 1.

2 心理声学客观参数计算分析

结合国外的声品质研究经验,用心理声学参数

来描述噪声听觉特性,本文选择了响度 L_d 、尖锐度 S_p 、粗糙度 C_r 、抖动度 S_t 、AI 指数 A_1 、音调度 L_t 等 6 个主要心理声学参数,以及 A 计权声压级 L_A 和线性声压级 L 这 2 个常用的噪声描述参数来进行分析. 利用 Artemis 软件,计算出 12 个噪声样本的 8 种客观参数值,见表 2.

为了研究车内噪声品质主观评价结果与心理声学客观参数之间的关系,使用统计学软件对表 1 中的声品质偏好性绩效值与相应的客观参数值进行了线性相关分析,相关系数 b_i 如表 3 所示. 表 3 表明,用于分析的 6 个主要心理声学参数中,其相关系数的绝对值达到了 80%以上的有响度、尖锐度、粗糙度、AI 指数,说明这些参数与偏好性绩效值存在明显的相关性. 2 种声压级的相关系数都较低,这说明心理声学参数更适合衡量车内噪声品质的偏好性.

3 车内噪声品质偏好性的数学模型

3.1 多元线性回归分析

通过上述分析,得到声品质主观评价结果与客

表 1 声品质偏好性绩效值

样本序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
绩效值	0.635	-0.549	1.059	0.268	0.652	-0.311	0.770	-0.072	0.698	-0.143	0.443	-0.893

表 2 客观参数的计算结果

样本序号	L_d/sone	S_p/acum	C_r/asper	S_t/vacil	A_1	L_t/tu	L_A/dB	L/dB
1	11.00	0.79	1.32	0.051 0	0.883	0.0375	60.5	85.3
2	21.00	1.27	2.13	0.047 8	0.668	0.031 3	57.8	84.6
3	8.32	0.66	0.86	0.032 4	0.972	0.031 0	66.9	87.0
4	13.40	1.10	1.97	0.041 3	0.756	0.025 5	65.9	87.8
5	16.80	0.80	1.59	0.043 1	0.915	0.043 0	66.6	85.5
6	22.80	1.27	2.01	0.038 8	0.627	0.035 9	65.6	86.0
7	9.99	0.94	1.53	0.036 8	0.933	0.031 1	65.4	88.3
8	20.00	1.21	1.69	0.047 6	0.769	0.028 2	68.3	91.4
9	11.20	0.92	1.43	0.045 1	0.822	0.018 3	64.5	88.4
10	20.40	1.26	2.11	0.047 9	0.685	0.025 0	65.6	89.6
11	17.20	0.85	1.27	0.048 7	0.894	0.032 8	73.4	92.1
12	27.10	1.26	1.98	0.042 4	0.675	0.030 9	68.6	93.5

表 3 声品质偏好性绩效值与客观参数的相关性分析结果

相关系数							
L_d	S_p	C_r	S_t	A_1	L_t	L_A	L
-0.933	-0.909	-0.829	-0.290	0.908	0.045	0.093	-0.304

观参数的计算结果,从而可利用多元线性回归分析方法来找出二者之间的内部关系,建立起声品质偏好性的数学模型.

根据车内噪声的声品质特性,以多元线性回归模型对车内声品质主观评价结果进行拟合描述,得到

$$\{y_m\} = d_0 + \sum_{i=1}^N d_i \{f_i(x_1, x_2, \cdots, x_m)\} + \{\epsilon_m\}$$

(2)

式中: y_m 为对 m 信号的声品质主观评价值(偏好性绩效值); d_i ($i=1, 2, \cdots, N$) 为模型的回归系数; b_0 为常数项; x_i ($i=1, 2, \cdots, m$) 为心理声学参数; $f_i(\cdot)$ 为心理声学参数的计算函数,可以是非线性函数或者是线性函数; ϵ_m 为测量误差. 式(2)的矩阵形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{B}\mathbf{d} + \boldsymbol{\epsilon} \\ \mathbf{y} &= \{y_1, y_2, \cdots, y_m\}^T \\ \mathbf{d} &= \{d_0, d_1, d_2, \cdots, d_N\}^T \\ \boldsymbol{\epsilon} &= \{\epsilon_1, \epsilon_2, \cdots, \epsilon_m\}^T \end{aligned}$$

(3)

式中: $\mathbf{B}$ 为列矩阵,其列向量为各噪声样本经函数 $f_i(\cdot)$ 计算的心理声学参数值.

式(3)即为主观评价结果与心理声学参数的回归方程. 式(3)中的心理声学参数或这些参数的函数可由下式求解

$$\mathbf{B}^T \mathbf{y} = [\mathbf{B}^T \mathbf{B}] \mathbf{d}$$

(4)

选择与主观评价值相关系数较高的心理声学参数代入式(4),经回归分析后,即可建立声品质偏好性的数学模型.

3.2 声品质偏好性数学模型

根据第 2 节中的相关分析结果,选择相关程度较高的响度、尖锐度、粗糙度、AI 指数进行回归分析. 采用统计学软件对式(3)进行求解,依据逐步法原则进行自变量选择,回归分析结果如表 4 所示. 表 4 表明,只有响度和尖锐度这 2 个参数进入了数学模型,粗糙度和 AI 指数均被排除. 从分析结果来看,模型预测结果与主观评价结果的相关系数达到 97%,决定系数达到 94.1%,说明模型具有较好的有效性.

根据表 4 中的非标准化系数,得到声品质偏好性主观评价值的多元线性回归方程

$$S_q = -0.059L_d - 1.198S_p + 2.42$$

(5)

式(5)即为该类轿车在匀速行驶工况下车内噪声品质偏好性的数学模型. 从式(5)中可见,响度和尖锐度成为该类轿车匀速行驶中车内噪声偏好性的主要

影响因素. 从表 4 的标准化系数中可看出,响度项的绝对值要大于尖锐度的绝对值,说明响度对噪声品质偏好性的影响更大. 式(5)同时也说明,对于该类轿车,要改善匀速行驶工况下的车内噪声品质,应该着重于对噪声的响度和尖锐度进行控制.

表 4 多元回归分析结果

决定因素	相关系数	决定系数	非标准化系数	标准化系数	置信概率 / %
常数项			2.420		0.0
响度	0.970	0.941	-0.059	-0.573	0.2
尖锐度			-1.198	-0.448	0.9

为了验证该声品质偏好性评价模型的准确性,对另一组噪声样本进行了主观评价与模型计算,如图 2 所示,二者结果的相关系数达到了 93.4%,说明该预测模型可以对匀速工况下的噪声偏好性作出较好的预测.

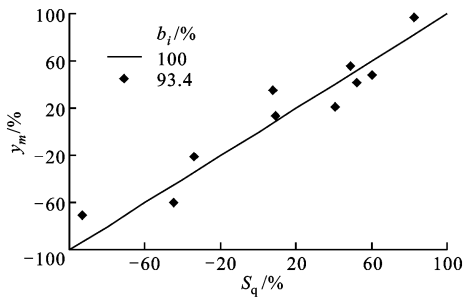


图 2 主观评价值与模型预测值的关系

4 结 论

本文提出了用客观参数来描述声品质主观评价的建模方法,对 6 辆同类型轿车在不同匀速工况下的车内噪声进行了声品质的主观评价和客观参数分析. 结果表明,相对于噪声分析中常用的 A 计权声压级和线性声压级,心理声学客观参数更适合于描述车内噪声的品质. 通过对主观评价结果和客观参数的计算结果进行多元线性回归分析,建立了车内噪声品质偏好性的数学模型. 试验结果表明,该类车型在匀速行驶工况下,其车内噪声品质主要受到响度、尖锐度因素的影响. 因此,要改善车内的噪声品质,必须进一步降低响度、尖锐度的水平.

参考文献:

[1] VAN DER AUWERAER H, WYCKAERT K, HENDRICKX W. An engineering approach to sound quality, SAE Paper, 962491 [R]. Washington DC, USA;

- SAE,1996.
- [2] RON I, NORM O, TOYA M. Sound quality metric for diesel engines, SAE Paper, 1999-01-1819 [R]. Washington DC, USA;SAE,1999.
- [3] DEBLAUWE F, VAN DE PONSEELE P. A sound quality system for engineers, SAE Paper, 2001-01-3834 [R]. Washington DC, USA;SAE,2001.
- [4] NORM O, SCOTT A. Guidelines for jury evaluations of automotive sounds, SAE Paper, 1999-01-1822 [R]. Washington DC, USA; SAE, 1999.
- [5] 闫靓,陈克安. 低频噪声声品质评价实验研究 [J]. 声学技术, 2006, 25(6): 540-546.
- YAN Liang, CHEN Ke'an. Jury studies of sound quality for low frequency noise [J]. Technical Acoustics, 2006, 25(6): 540-546.
- [6] 汪念平, 陈剑, 钟秤平. 汽车声品质分析方法与评价流程 [J]. 汽车工程, 2007, 29(9): 800-803.
- WANG Nianping, CHEN Jian, ZHONG Chengping. The analysis methods and evaluation procedure of vehicle sound quality [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(9): 800-803.
- [7] 卢祥林,王红剑. 汽车及发动机噪声声品质研究现状与展望 [J]. 装备制造技术, 2007, 35(8): 94-97.
- LU Xianglin, WANG Hongjian. Research actuality and expectation of noise sound quality of automobile and engine [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007, 35(8): 94-97.
- [8] 宋乃华,左言言. 汽车声音品质评价参数探讨 [J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(4): 94-97.
- SONG Naihua, ZUO Yanyan. Evaluation parameters research of vehicle sound quality [J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(4): 94-97.
- [9] 毛东兴,俞悟周. 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. Statistical validation and criterion for paired comparison data in sound quality evaluation [J]. Acta Acustica, 2005, 30(5): 468-472.
- [10] STEPHEN B, PAUL J. Improving the effectiveness of paired comparison test for automotive sound quality [C]// Proceedings of Eleventh International Congress on Sound and Vibration. New York, USA: McGraw-Hill, 2004: 3029-3036.

(编辑 管咏梅)