

DOI: 10.7652/xjtuxb201508016

电动车噪声品质心理声学主客观评价模型

方源^{1,2}, 章桐^{1,2,3}, 陈霏霏^{1,2}, 郭荣^{1,2}

(1. 同济大学新能源汽车工程中心, 201804, 上海; 2. 同济大学汽车学院, 201804, 上海;
3. 同济大学中德学院, 201804, 上海)

摘要: 以某电动车在匀速行驶时采集到的噪声样本为评价对象,结合人类听觉系统建立适用于电动车的客观评价指标——敏感频带能量比,采用等级评分法对电动车噪声品质焦躁度进行主观评价试验,分析并计算各噪声样本的心理声学客观参数。通过相关分析和回归分析,建立了可描述主观评价与客观参量相关性的焦躁度评价模型。研究表明:传统车噪声在低频段能量较为集中,最大值在中心频率为 200 Hz 的频带,峰值达到 37%,而电动车噪声能量集中在中心频率高于 1 kHz 的频率段上,峰值达到 30%;敏感频带能量比与主观评价值的相关性达到 0.958,优于其他心理声学参数;电动车噪声品质焦躁度主要受粗糙度、抖动度和频带能量比等心理声学客观参数影响。

关键词: 电动车;噪声品质;主观评价;心理声学

中图分类号: U463.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)08-0097-05

A Subjective and Objective Evaluation Model for Psychoacoustical Quality of Electric Vehicle Noise

FANG Yuan^{1,2}, ZHANG Tong^{1,2,3}, CHEN Feifei^{1,2}, GUO Rong^{1,2}

(1. New Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Sino-German
College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Noises of an electric vehicle (EV) at different speeds are sampled as the evaluation objects. An objective evaluation parameter, sensitive frequency-band energy ratio(SFBER), is established by combining with the human auditory system characteristics. The subjective evaluation test of sound quality annoyance is carried out by using the grading method. Several objective psychoacoustical parameters are calculated, and for each sample and a subjective evaluation model describing the correlation between subjective annoyance evaluations and psychoacoustical objective parameters is established through analyses of linear correlation and multi linear regression. The results show that the noise energy of traditional cars is concentrated in low frequency band and the maximum reaches 37% when the central frequency is the frequency band of 200 Hz, while the noise energy of electric vehicles is concentrated on the frequency band with its center frequency above 1 kHz and the peak value reaches 30%. The correlation between SFBER and annoyance is 0.958 and is better than the other psychoacoustical parameters. The EV sound quality annoyance is affected mainly by three psychoacoustical parameters, i. e. roughness,

收稿日期: 2014-12-27。 作者简介: 方源(1989—),男,博士生;章桐(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2011AA11A265);国家自然科学基金资助项目(51205290);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(1700219118)。

网络出版时间: 2015-05-15 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150515.1747.001.html>

fluctuation and SFBER.

Keywords: electric vehicle; noise sound quality; subjective evaluation; psychoacoustics

随着消费者对汽车质量和舒适性要求的提高,传统的 A 计权声压级已不足以描述汽车噪声的全部特征,噪声品质的设计与提高已成为目前汽车研发过程中必须考虑的一项重要内容。

现阶段,声品质的研究大多还停留在主观评价试验,2010 年,Huallpa 等人对汽车换挡时的齿轮噪声进行了声品质主观评价研究,分析了尖锐度、响度等客观参数与主观评价结果的相关性^[1]。2013 年,赵林风等人研究了行驶场景对汽车噪声响度主观评价的影响^[2]。然而,主观试验步骤繁琐且重复性差,耗费很多的人力物力和财力,因此有学者开始进行噪声品质主观评价预测模型的研究。2000 年,Hashimoto 等人将 300 Hz 以下的低频噪声对人的主观感受称为轰鸣感,并提出将轰鸣指数作为汽车加速噪声的客观评价参数^[3]。2007 年,Sasaki 等人基于听觉系统建立了累计抖动感作为评价柴油机噪声的客观参数^[4]。2013 年,徐中明等人对汽车喇叭声进行了主观评价试验,通过相关和回归分析建立了喇叭声偏好性评价模型^[5]。电动车的出现一度被认为不存在振动噪声问题,但是研究发现,电动车的振动噪声问题不仅存在而且带来了新的挑战:①电机的高频电磁噪声影响了汽车的噪声品质;②高转速、大扭矩的电机特性使得齿轮啸叫声格外突出;③没有了发动机的掩蔽效应,汽车辅助系统(真空泵、水泵、A/C 压缩机等)的噪声将突显出来。研究发现,某些工况下电动车的声品质差于传统车。2011 年,许雪莹等人分析了传统内燃机汽车和电动汽车的噪声特性差异,发现传统的 A 计权声压级不再适用于电动车噪声的评价,而需要结合心理声学进行主观评价^[6]。同年,Okoshi 等人通过对比电动车与传统车噪声特性的差异,发现声品质客观评价参数更适用于分析电动车噪声特性,而且电动车的声场分布极不均匀^[7]。但是,目前对于电动车声品质的研究还主要集中在基本的心理声学参数进行试验研究,鲜有文献基于电动车存在的噪声频域特性和人类听觉系统进行主客观声品质预测模型的研究。

本文结合人类听觉系统特性,针对电动车高频噪声显著的特点提出了敏感频带能量比作为客观评价指标,并与主观评价指标焦躁度进行相关性分析,最后利用多元线性回归拟合出能够预测电动车焦躁度的声品质预测模型。

1 噪声样本采集与主观评价

1.1 噪声样本采集

在半消声室实验室内,进行电动车噪声采集试验,数据采集现场如图 1 所示。试验设备采用 LMS Testlab 多通道声振测试与分析系统,人工头采样频率为 44 kHz,选取不同工况下的电动车噪声样本作为主观评价样本。

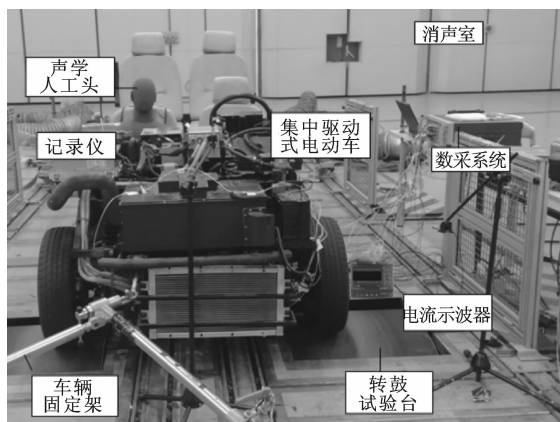


图1 数据采集现场

1.2 主观评价指标

缺少了内燃机的噪声,电动车的声压级得到了明显的降低。正因如此,很多原本不明显的噪声变得更加显著,且多为高频噪声。研究发现,长时间暴露在高频噪声中会使驾驶员感到烦躁,从而影响了其驾驶行为^[8]。因此,本文选取焦躁度作为电动车主观评价指标,以反映电动车噪声对人焦虑烦躁的程度。

1.3 主观评价试验

在主观评价试验中将采集到的噪音样本进行高保真回放,试验设备如图 2 所示。



图2 回放设备及电脑

本次试验选取了 21 名评价者进行主观试验,其中男性 15 名,女性 6 名,均为车辆专业的研究生。试验前,对评价者进行了声品质基础知识和试验内容的相关培训,确保主观评价试验的正确性和可信度。

声品质的主观评价试验方法主要有排序法、等级打分法、成对比较法、语义细分法等^[9]。评价方法根据评价任务和要求的不同来确定,针对不同的测试内容采用与之相适应的评价方法。本次试验采用等级评分法,评价者对听到的噪声样本进行焦躁度打分,焦躁度等级为 1~10 分,即从悦耳到极度焦躁。

1.4 试验结果的有效性分析

样本最终的噪声品质分值为所有评价主体对噪声样本声品质打分值的平均值,部分结果如表 1 所示。

表 1 评价主体对焦躁度打分结果

编号	焦躁度	编号	焦躁度
1	3.3	14	8.8
2	4.1	15	9.4
3	3.9	16	9.1
4	3.7	17	4.5
5	5.5	18	4.3
6	5.3	19	5.0
7	5.9	20	3.2
8	5.9	21	6.9
9	7.1	22	7.2
10	6.8	23	5.6
11	7.7	24	8.6
12	8.2	25	9.1
13	8.9	26	9.4

利用 SPSS 软件分析各个评价主体之间的 Kendall 相关系数,如图 3 所示。根据相关性的 大小,剔除评价主体 1 号、18 号和 21 号这 3 个评价主体的数据,确保数据的有效性^[10]。

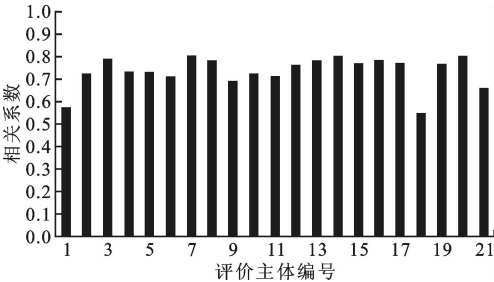


图 3 各评价主体之间的相关系数平均值

2 心理声学客观参数计算分析

2.1 人类听觉特性

人类的听阈频率下限是 20 Hz,上限为 20 kHz。采用 1/3 倍频程滤波器将声音分解成 30 个频率段,

以模拟耳蜗的功能,图 4 为 1/3 倍频程滤波器对第一频带的幅频响应曲线。

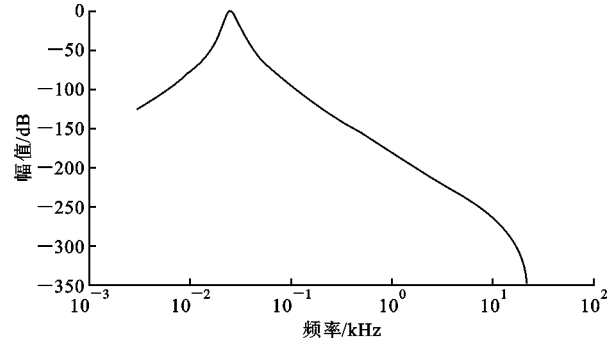


图 4 1/3 倍频程滤波器的幅频响应曲线

在声音的接收阶段,人的听觉系统可以很好地跟踪声信号,但在信号衰减过程中,跟踪速度则要慢于实际声信号,此时就产生了时域掩蔽,掩蔽作用原理如下^[4]

$$y(n) = (1 - \frac{\Delta t}{\tau})y(n - 1) + (\frac{\Delta t}{\tau})x(n)$$
$$y(1) = 0, t = n\Delta t, n = 2, 3, 4, \dots,$$
$$\tau = \begin{cases} \tau_{up}, & x(n) \geq y(n - 1) \\ \tau_{down}, & x(n) < y(n - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为声压密度曲线的包络线; $y(n)$ 为一阶滞后系统的输出; Δt 为离散时间间隔; τ_{up} 和 τ_{down} 分别为时域掩蔽导前和滞后系数。

图 5 为通过 Matlab 编程模拟得到的听觉系统处理前后的声信号。

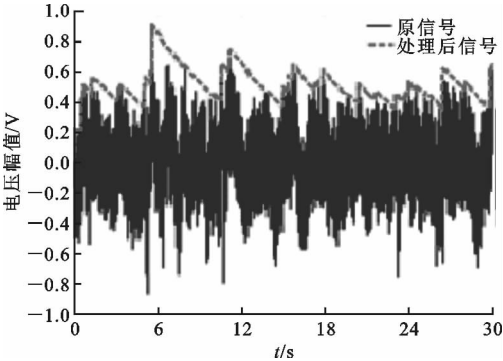


图 5 耳蜗处理前后的声信号

人耳对不同频率的声音有不同的灵敏性。目前,A 计权声压级的特性曲线由于接近于人耳的听感特性而得到了广泛应用。

2.2 敏感频带能量比

将整车噪声采集试验中采集到的噪声样本按照 2.1 节中人类听觉特性处理之后,可得到每个噪声样本在各个频段上的能量百分比值。

图 6 为电动车与传统车噪声能量的分布情况,

由图 6 可知,传统车噪声在低频段能量较为集中,最大值在中心频率为 200 Hz 的频带,峰值达 37% 左右。电动车噪声能量集中在中心频率高于 1 kHz 的频率段上,峰值达到 30% 左右。由此可见,电动车与传统车的声学特性在频率分布上存在区别。

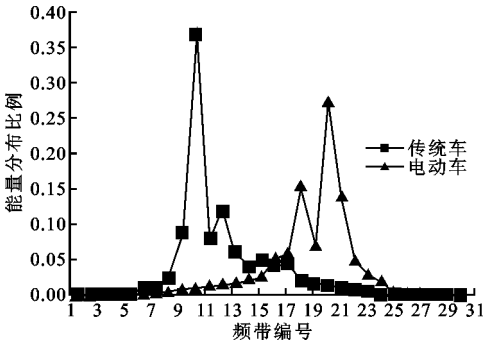


图 6 电动车与传统车噪声能量分布图

根据电动车声品质频谱特性,建立敏感频带能量比作为声品质客观评价参数

$$R(f_i) = \sum_{i=1}^n F(f_i) = \frac{(E_{f_{k1}} + E_{f_{k2}} + \cdots + E_{f_{kj}})}{\sum_{i=1}^n (E_{f_i})} \tag{2}$$

式中: f_i 为 1/3 倍频程中心频率, $i=1,2,\cdots,30$ 为频带编号; f_{ki} 为敏感频带的中心频率; F 为各敏感频率带上的能量比; E 为总能量。

根据各频带与声品质主观评价相关性结果(见图 7),结合电动车噪声频谱特性(见图 6)选取频带 19、20 和 21,即以 1 584 Hz、1 895 Hz 和 2 511 Hz 为中心频率的频率带作为相关频率带。

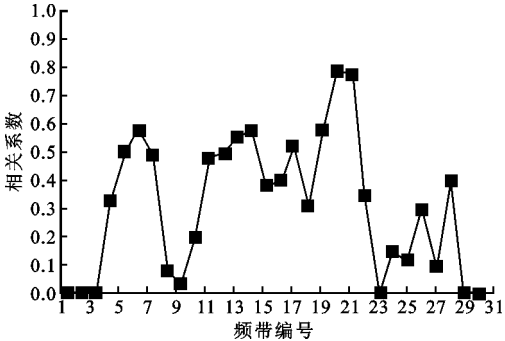


图 7 各频带与声品质相关系数

2.3 主客观相关性分析

对主观评价值与各噪声样本的客观参数进行相关性分析,选取的客观评价参数包括响度(L)、尖锐度(S)、粗糙度(r)、抖动度(F)、语意清晰度(A_1)以及前文所建立的敏感频带能量比(R)。部分噪声样本的客观参数计算结果如表 2 所示。

表 2 部分噪声样本客观评价指标计算结果

编号	$L/sone$	$S/acum$	$r/asper$	$F/vacil$	$A_1/\%$	$R/\%$
1	27.45	2.97	2.76	0.0013	31.3	27.7
2	28.2	3.02	2.83	0.015	29.7	24.9
3	29.7	3.04	2.91	0.015	26.7	29.5
4	29.9	3.04	2.86	0.014	26.4	26.8

各客观评价参数与主观评价的相关性如表 3 中所示。可以看出,主观评价结果与响度、尖锐度、语意清晰度、粗糙度和敏感频带能量比都存在较强的相关,说明评价主体对电动车噪声的主观感受与多种因素有关。其中,敏感频带能量比的相关系数为 0.958,表示敏感频带能量比越高而主观焦躁度得分越高。并且远高于其他客观评价参数,说明敏感频带能量比可以较好地反映噪声样本的主观焦躁程度,能较好地对噪声样本的焦躁程度进行预测。敏感频带能量比的散点拟合图如 8 所示,可以看出敏感频带能量比与焦躁度能够很好地线性拟合。

表 3 焦躁度品质与客观参数的相关性分析结果

L	S	A_1	F	r	R
0.683**	0.790**	-0.680*	0.351**	0.728**	0.958**

注:* 表示双侧显著度水平低于 0.05;* * 表示双侧显著度水平低于 0.01。

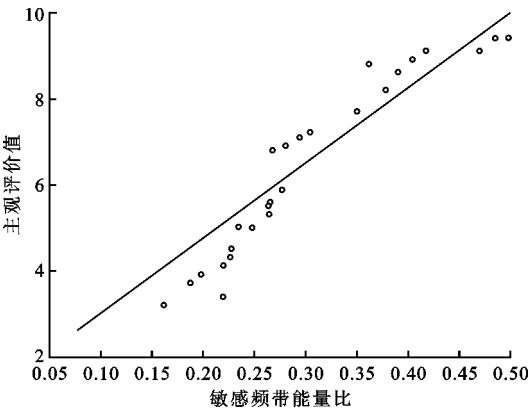


图 8 敏感频带能量比和焦躁度品质的拟合曲线

3 噪声品质主观预测模型

通过对主观评价值与客观参数进行多元线性回归分析,可以建立电动车噪声品质客观量化模型,将表 3 中的心理声学客观评价参数和敏感频带能量比作为自变量,焦躁度作为因变量。

使用 SPSS 软件进行线性回归分析,分析方式选择“逐步”,软件将分析每个自变量和因变量的关系以及拟合表现,通过舍弃预测较差的自变量,并进

行不同预测模型的比较,拟合出表现最好的多元线性回归系数如表 4 所示。由表 4 可知,进入回归方程的是粗糙度、抖动度和敏感频带能量比,而尖锐度、响度和语义清晰度参数则被舍弃,这说明相对尖锐度、响度和语义清晰度而言,粗糙度、抖动度和敏感频带能量比这 3 个参数对试验所用的电动车噪声品质焦躁度的影响更大,最终确定电动车噪声品质焦躁度预测模型为

$$Q = 5.502r + 139.209F - 0.71R - 8.574 \quad (3)$$

式中:Q 为噪声品质主观评价指标。

表 4 模型回归系数值

决定因素	非标准化系数	显著性
常数项	−8.574	0.000
粗糙度	5.502	0.000
抖动度	139.209	0.003
敏感频带能量比	−0.71	0.014

对焦躁度预测模型进行回归方程的显著性检验、回归系数的显著性检验和残差分析,以验证模型的正确性。此回归方程式(3)的回归平方和为 92.824,残差平方和为 6.883,总平方和为 99.707,对应的 F 统计量为 116.887,显著性水平均小于 0.05,因此可以认为所建立的回归方程有效。

4 结 论

本文结合人类的听觉系统特性和噪声品质频域特性,提出评价电动车噪声品质的客观评价参数——敏感频带能量比,对不同工况下的电动车噪声进行了噪声品质的主观评价和客观参数分析。通过客观评价参数与主观评价值的相关性分析,发现敏感频带能量比的表现良好,相关系数达到了 0.958,优于其他的心理声学参数,说明敏感频带能量比在一定程度上可以较好地反映电动车的声品质。通过多元线性回归分析,建立了匀速工况下电动车噪声品质焦躁度评价模型。分析结果表明,电动车噪声品质主要受粗糙度、抖动度以及敏感频带能量比等客观参数的影响。

参考文献:

[1] HUALLPA B, MARANO J, SCZIBOR V, et al. Gear lever sound quality evaluation [EB/OL]. (2010-10-06)[2014-08-15]. <http://digitallibrary.sae.org/content/2010-36-0369>.

[2] 赵林风,郑四发,连小珉,等. 场景视频对汽车声品质评价的影响 [J]. 汽车工程, 2013, 35(6): 538-542.

ZHAO Linfeng, ZHENG Sifa, LIAN Xiaomin, et al. Influences of scene video on the sound quality evaluation of vehicle noise [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(6): 538-542.

[3] HASHIMOTO T. Sound quality approach on vehicle interior and exterior noise: quantification of frequency related attributes and impulsiveness [J]. Journal of Acoustical Society of Japan, 2000, 21(6): 337-340.

[4] SASAKI M, NAKASHIMA K. Human auditory models and sound quality evaluation method for diesel noise [EB/OL]. (2007-05-15)[2014-08-16]. <http://digital.library.sae.org/content/2007-01-2219>.

[5] 徐中明,张芳,周小林,等. 汽车喇叭声品质主观评价与分析 [J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 188-192.

XU Zhongming, ZHANG Fang, ZHOU Xiaolin, et al. Subjective evaluation and analysis on car horn sound quality [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(2): 188-192.

[6] 许雪莹,韩国华,吴瑛,等. 电动汽车的噪声特点及评价方法 [J]. 汽车工程学报, 2011, 1(S1): 17-20.

XU Xueying, HAN Guohua, WU Ying, et al. Sound character and evaluation method of electric vehicle [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(S1): 17-20.

[7] OKOSHI M, HASHIMOTO Y, SUZUKI M, et al. Test equipment maker's cooperative approach to the measurement next generation automobiles: comparison of noise and vibration characteristics between ice vehicle and EV [EB/OL]. (2011-05-17)[2014-08-16]. <http://digitallibrary.sae.org/content/2011-39-7202>.

[8] HUSSAIN M, GOLLES J, RONACHE A, et al. Statistical evaluation of an annoyance index for engine noise recordings [EB/OL]. (1991-05-01)[2014-08-15]. <http://digitallibrary.sae.org/content/911080>.

[9] 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.

[10] 徐海卿,周铨,任永连. 考虑驾驶员反应时间和注意力的噪声品质主观评价 [J]. 汽车工程, 2013, 35(8): 740-743.

XU Haiqing, ZHOU Hong, REN Yonglian. Subjective evaluation on noise sound quality with considerations of driver's response time and attention [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(8): 740-743.

(编辑 刘杨 苗凌)