

文章编号:1006-1355(2021)03-0187-05+203

电动汽车电驱动噪声声品质主客观评价模型

刁 坤, 汪晓虎, 王伟东

(泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201)

摘要:电动汽车电驱动噪声声品质评估,一直是汽车工业内研究的热点和难点问题。有针对性地选取国内外主流的多款电动汽车,基于车内电驱动噪声的声品质特性,提出电驱动噪声的声品质主观评价工况、指标和方法,计算主观评价烦扰度的统计值。制定基于道路试验的电动汽车电驱动噪声测试方法,提取抱怨工况的电驱动噪声频谱特性,首次考虑同时存在多个阶次的噪声特性,分别提取多款电动汽车的 TNR_{max} (Tone to noise ratio, TNR)值和Total TNR值,并基于主观评价烦扰度和客观测试值,建立电动汽车车内电驱动噪声声品质回归模型,可实现电驱动噪声声品质的精准预测,并指导电驱动噪声声品质的正向开发。

关键词:声学;电动汽车;电驱动噪声;声品质;Total TNR;回归模型

中图分类号:U467.4'93

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.03.032

Subjective and Objective Evaluation Model of Sound Quality of Drive Unit Tonal Noise of Electric Vehicles

DIAO Kun , WANG Xiaohu , WANG Weidong

(Pan Asia Technical Automotive Center, Shanghai 201201, China)

Abstract : Sound quality evaluation of drive unit tonal noise of electric vehicles is always a hot and difficult issue in automotive industry. In this study, six mainstream electric vehicles are selected to analyze interior tonal noise of the electric drive unit. The operating condition, index and method of the interior sound quality of subjective evaluation are proposed, and the statistical index for subjective annoyance evaluation is calculated. On-road test procedure of the interior noise of the electric drive unit is prepared and carried out to extract the spectral characteristics of the interior noise in customer's complaining condition. Psychoacoustics index of total TNR is first used for sound quality evaluation of the electric drive unit tonal noise with multiple orders. Sound quality regression model of the electric drive unit tonal noise is established based on subjective evaluation annoyance rating and objective test index. This sound quality regression model can predict the interior tonal noise of electric drive units accurately. This study has given an important guidance for evaluation and improvement of interior sound quality of electric drive units.

Key words : acoustics; electric vehicle; electric drive unit noise; sound quality; total TNR; regression model

随着全球汽车工业的飞速发展,传统能源供需矛盾日益凸显,存在潜在的能源危机。为此,各国政府大力推广新能源汽车,特别是电动汽车的发展,使全球汽车公司都投入了大量人力、物力和财力开发电动汽车^[1]。与此同时,电动汽车电驱动系统(包含电机和减速器)噪声也越来越受到关注,成为业内的热点和难点问题。而电动汽车电驱动噪声的声品质特征和传统内燃机噪声差异显著^[2-3],导致传统内燃机噪声评估方法已经完全不适用,亟需建立针对于电驱动噪声的声品质评估方法。

法,从电驱动噪声的发生机理,声品质特性和关键评价指标等几个方面开展了深入的研究。电驱动阶次噪声主要由减速器齿轮啮合和电磁力矩波动产生中高频振动,传递到电驱动系统壳体,进而辐射噪声,并呈显著的中高频阶次特性^[4-5]。徐忠四等^[6]发现齿轮传递误差和齿面接触应力是影响减速器噪声的主要原因,并通过齿轮优化修形有效地降低了车内阶次噪声。同济大学左曙光教授团队^[7]研究了电机中高频阶次噪声的发生机理。文献[8]对电驱动噪声的响度、尖锐度、粗糙度、抖动度和语音清晰度等客观心理声学指标进行深入研究,通过主客观相关性分析,认为尖锐度和响度所占的权重较大。通用汽车^[9]和沃尔沃汽车^[10]的研究人员通过试验研究发现,心理声学指标 TNR 更适用于电动汽车的阶次噪声

收稿日期:2020-08-04

作者简介:刁坤(1986-),男,合肥市人,博士,主要研究方向为振动噪声控制技术,整车 NVH 性能开发。

E-mail: auto_diaokun@163.com

声品质评价,但受到TNR算法的局限性^[11],当多个阶次噪声同时存在时,只能计算单一阶次噪声的TNR值。因此,还鲜有文献有针对性地分析同时存在多个阶次的电动汽车电驱动噪声声品质特性和评价方法。

因此,本文首先制定了电动汽车电驱动噪声主观评价方法和基于道路试验的电动汽车电驱动噪声测试方法,并通过对国内外市场上主流的电动汽车车内电驱动噪声进行主观评价和客观测试分析,首次采用了可同时考虑多个阶次的心理声学指标Total TNR^[12],分析抱怨工况的电驱动噪声特性,通过主客观相关性分析,建立电动汽车电驱动噪声声品质回归模型,可实现电驱动噪声声品质的精准预测,并指导电驱动噪声声品质的正向开发。

1 电驱动噪声主观评价和客观测试

1.1 电动汽车的选取

有针对性地选取了近年来国内外市场上主流的6款纯电动汽车,车型和驱动系统关键参数如表1所示。这6款纯电动车产地包含了美国、德国和中国,品牌包含了外资品牌、合资品牌和自主品牌,市场定位包含了高端、中端和低端车型,车辆类型包含了运动型多用途汽车(Sport utility vehicle,SUV)、掀背两厢车(Hatchback)和三厢轿车(Sedan),驱动形式包含了前轮驱动、后轮驱动和四轮驱动,电机类型包含了永磁同步电机和感应异步电机。因此,这6款电动汽车几乎涵盖了国内外市场上所有的电动汽车类型,具有较强的代表性。

1.2 工况的选取

前期研究表明,车内的电驱动噪声受到路噪和风噪的掩蔽效应影响显著^[9]。因此,主观评价和客观测试都在上汽通用广德试车场车内噪声路的光滑平直水泥路面上进行,综合考虑了电动汽车在实际行驶工况时路噪和风噪的影响。

此外,由于电驱动系统辐射噪声,特别是电磁力矩波动引起的中高阶次辐射噪声,一般都随着电驱动系统的负载增大而增加,因此全油门工况(Wide open throttle,WOT)是车内电驱动噪声最恶劣的工况,最容易引起客户的抱怨。因此,所有的主观评价和客观测试,都采用从车辆完全静止,全油门加速至120 km/h的工况。此外,主观评价和客观测试都以驾驶员位置噪声的打分值和测试数据为主。

1.3 主观评价

本次主观评价组织了共50名主观评价人员,其都为电动汽车开发项目工程师(28人)和NVH开发工程师(22人),其中男性41名,女性9名。为了保证主观评价数据的准确性和可信度,在评估前,对所有主观评价人员进行了专业的声品质基础知识和主观评价方法的培训。

常用声品质的主观评价方法有排序法、评分法、成对比较法和语义细分法等^[13]。本次主观评价采用了评分法,主观评价人员对车辆WOT全油门加速行驶过程中(车速从0 km/h到120 km/h),车内电驱动噪声引起的烦扰度进行打分,烦扰度等级为1~10分,从极度烦扰,无法接受到非常悦耳,分值越高,声品质越好,如表2所示。同时,分别记录50名主观评估人员对每辆电动汽车车内电驱动噪声最抱怨的车速区间。

1.4 客观测试

为了保证主观评价和客观测试的一致性,客观测试采用与主观评估完全相同的工况——车辆从完全静止,全油门加速至120 km/h。

车内噪声的数据采集系统为LMS便携式12通道数据采集系统,车内噪声采集采用PCB-377A60随机场麦克风,车速采集采用V-BOX系统。

车内噪声信号的测点有2个——前排驾驶员右耳处和后排右座椅位置,驾驶员右耳处麦克风布置如图1所示。

表 1 选取的电动汽车车型和驱动系统关键参数

序号	品牌	型号	年份	电机类型	0~100 km/h 加速时间/s	驱动形式	电机功率/kW 峰值扭矩/Nm				电机极数	定子槽数
							前	后	前	后		
1	Tesla	Model X 75D	2016	感应异步	5.2	双电机四驱	193	193	330	330	4	60
2	Denza	Denza EV	2017	永磁同步	14.0	前置前驱	86	/	290	/	8	48
3	BMW	i3	2016	永磁同步	7.3	后置后驱	/	125	/	250	12	72
4	Emgrand	Emgrand EV	2017	永磁同步	9.9	前置前驱	95	/	240	/	8	48
5	BYD	Qin EV300	2017	永磁同步	7.9	前置前驱	160	/	310	/	8	48
6	BYD	Song EV300	2017	永磁同步	8.9	前置前驱	160	/	310	/	8	48

表2 烦扰度等级和描述

烦扰度	描述
10	非常悦耳
9	非常好,大多数顾客喜爱
8	严苛顾客可以接受,极少数顾客抱怨
7	大多数顾客可以接受,少数顾客抱怨
6	部分顾客可以接受,部分顾客抱怨
5	少数顾客接受,多数顾客抱怨
4	大多数顾客抱怨
3	部分顾客无法接受
2	大多数顾客无法接受
1	所有人都无法接受

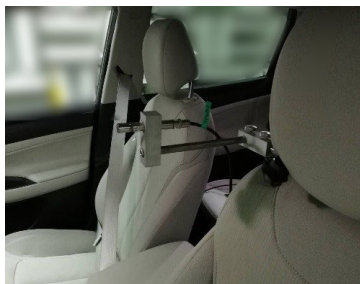


图1 噪声信号测点(驾驶员右耳)布置

2 主观评价统计值分析

由于50名主观评价人员的烦扰度分值存在一定的分布特性,因此针对每辆电动汽车的烦扰度分值进行均值和标准差(如式(1),式(2)所示)计算,剔除奇异数据点,确保主观评价数据的有效性。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

式中: μ 为均值; N 为样本数; x_i 为样本值(烦扰度分值); σ 为标准差。

电驱动噪声主观评价烦扰度统计分析流程,如图2所示,主要分为以下几个环节,具体描述如下:

(1) 计算主观评价烦扰度值统计指标——平均值和标准差。(2) 判断50个样本的烦扰度值是否满足 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 区间分布。如若满足,则直接跳至步骤(4),分析结束;如若不满足,则剔除 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 区间外的奇异数据点;(3) 重新计算剩余样本烦扰度的平均值和标准差,重复步骤(2),直至最终的样本烦扰度值满足 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 区间分布。(4) 获取最终的烦扰度统计平均值和标准差。

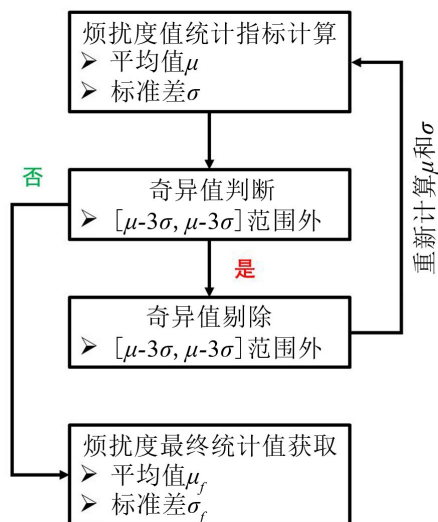


图2 电驱动噪声主观烦扰度统计分析流程图

分别对选取的6辆电动汽车的主观评价烦扰度数据进行统计分析,计算其电驱动噪声烦扰度统计值,如表3所示。根据主观评价人员的分值,Tesla Model X的电驱动噪声烦扰度分值最高,其次是BMW i3、BYD Song EV、BYD Qin EV、Denza EV,而Emgrand EV的烦扰度分值最低。

3 客观测试数据研究

3.1 车内噪声数据分析

将6辆电动汽车全油门工况采集的驾驶员右耳处噪声信号进行短时傅里叶变换(Short-time fourier transform,简称STFT),得到噪声时频图。以BMW i3和Emgrand EV的车内噪声为例,如图3(a)和图3(b)所示。

由图3(a)和图3(b)分析可知:(1)电动汽车车内电驱动噪声主要表现为中高频的阶次噪声。(2)路噪和风噪值,以及其频率覆盖带宽都随着车速的增大而增大,这对中高车速时(80 km/h~120 km/h)的电驱动噪声起到较好的掩蔽效果。(3)BWM i3在中低车速时,存在25阶(减速器输入齿轮阶次)和72阶(电机槽数阶次)噪声;而Emgrand EV在整个车速区间都存在较为显著的22阶(减速器输入齿轮阶次)和48阶(电机槽数阶次)噪声。(4)Emgrand EV的阶次噪声较BMW i3更为显著,这与主观评价的结果一致。

3.2 TNR和Total TNR

TNR是一种用于量化单调噪声的心理声学指

表3 电动汽车电驱动噪声烦扰度统计值

电动汽车		Tesla Model X	Denza EV	BMW i3	Emgrand EV	BYD Qin EV	BYD Song EV
电驱动噪声烦扰度	平均值	7.58	6.58	7.44	6.39	6.98	7.21
	标准差	0.23	0.24	0.28	0.32	0.30	0.25

标,其表征了单调噪声(频率窄带)的能量与其临近频率(宽带)噪声能量的比值。研究人员^[9-10]发现,TNR非常适合用于表征电动汽车电驱动系统的阶次啸叫特征,其阶次啸叫即为窄带噪声,而该阶次啸叫临近的路噪和风噪为掩蔽噪声,即为宽带噪声。

但由于TNR算法的局限性,其只适用于计算频谱内的单一阶次噪声,因此引入适用于同时存在多个阶次噪声的Total TNR。

TNR和Total TNR的定义如式(3)至式(5)所示:

$$\text{TNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{X_t}{X_n} \right) \quad (3)$$

$$X_n = (X_m - X_t) \cdot \frac{\Delta f_m}{(\Delta f_m - \Delta f_t)} \quad (4)$$

$$\text{Total TNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^k \text{TNR}_i \right) \quad (5)$$

式中: X_t 为窄带阶次噪声能量,单位Pa; X_m 为宽带噪声总能量,单位Pa; X_n 为宽带内除了窄带阶次噪声的其它噪声能量(掩蔽噪声能量),单位Pa; Δf_m 为宽带噪声的带宽,单位Hz; Δf_t 为窄带阶次噪声的带宽,单位Hz; k 为同时存在的窄带阶次噪声的数量。

3.3 车内噪声TNR_{max}和Total TNR计算

基于记录的主观评价人员抱怨的车速区间,并结合车内噪声时频图,从车内噪声频谱曲线中提取6辆电动汽车电驱动噪声最被抱怨的车速下的阶次噪声中心频率,计算每阶噪声的TNR值和多个阶次的Total TNR值,如表5所示。

由表4分析可知:(1)Tesla Model X在其抱怨车速下只存在一个显著阶次噪声,而Denza EV、BMW i3和Emgrand EV同时存在2个显著阶次噪声,BYD Qin EV和BYD Song EV同时存在3个显著阶次噪声。(2)TNR_{max}值对比,BYD Song EV最优,Emgrand

EV最差。(3)Total TNR值对比,Tesla Model X最优,Emgrand EV最差。

4 电驱动噪声声品质主观预测模型

将上文计算的TNR_{max}和Total TNR值,结合主观评价烦扰度值,分别建立电动汽车电驱动噪声声品质线性回归模型,将心理声学指标TNR_{max}和Total TNR作为自变量,主观评价烦扰度作为因变量,如图4(a)和图4(b)所示。

由图4(a)和图4(b)分析可知:(1)相比于TNR_{max},Total TNR和主观评价烦扰度具有更好的相关性和拟合度,其判定系数 R^2 为98%,高于TNR_{max}与主观评价烦扰度的判定系数($R^2=80\%$)。(2)对比TNR_{max}值和Total TNR值发现,若只存在1阶较为显著的阶次噪声时,TNR_{max}值和Total TNR值相等;若同时存在多个阶次噪声,但其中某1阶噪声TNR值显著大于其他阶次噪声TNR值时,Total TNR值略微大于TNR_{max}值;若同时存在多个阶次噪声,且各阶次噪声的TNR值较为接近时,Total TNR值将显著大于TNR_{max}值。

综上所述,当电动汽车电驱动噪声同时存在多个阶次噪声时,心理声学指标TNR_{max}不再适用,应采用Total TNR表征电动汽车车内电驱动噪声声品质特性,并与主观评价烦扰度具有较强的相关性和拟合度。

5 结语

本文基于国内外市场上主流的6辆电动汽车的电驱动噪声特性,开展了主观评价和客观测试研究,建立了电动汽车电驱动噪声声品质回归模型,得到结论和成果如下:

(1)建立了基于光滑道路试验的车内电驱动噪

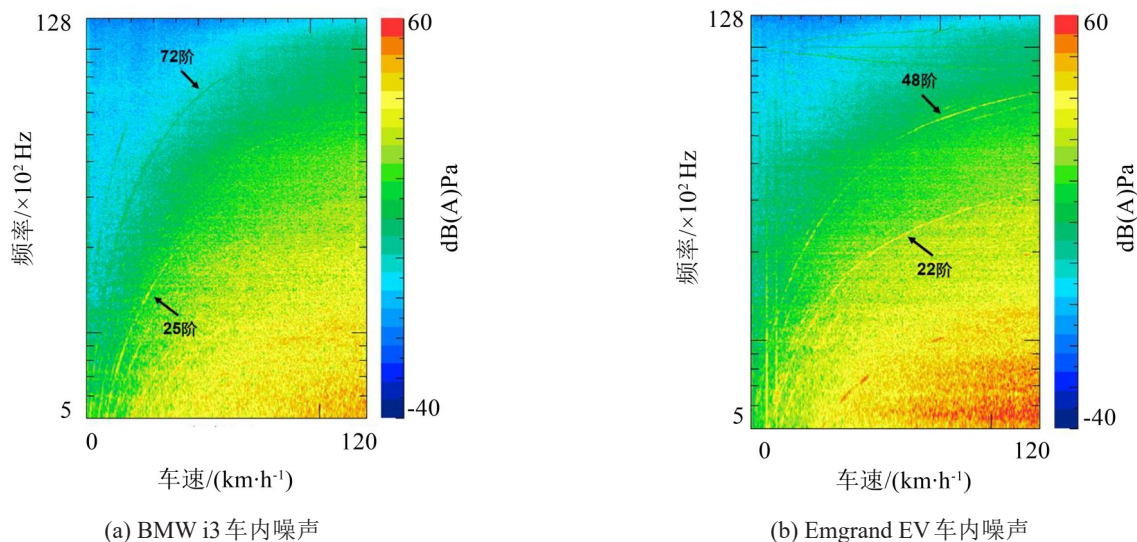
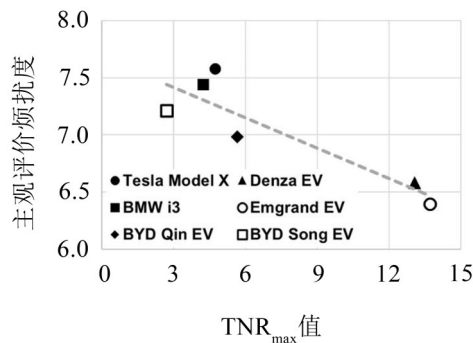
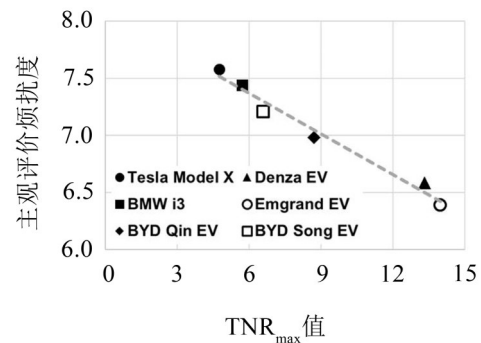


图3 全油门工况车内噪声(驾驶员右耳处)

表4 电动汽车车内各阶次噪声中心频率、 TNR_i 值、 TNR_{max} 值和Total TNR值

电动汽车	阶次	阶次1	阶次2	阶次3	TNR_{max}	Total TNR	主观评价烦扰度
Tesla Model X	中心频率/Hz	1 224	/	/	4.74	4.74	7.58
	TNR_i	4.74	/	/			
Denza EV	中心频率/Hz	816	2 328	/	13.08	13.32	6.58
	TNR_i	0.75	13.08	/			
BMW i3	中心频率/Hz	1 728	4 968	/	4.25	5.70	7.44
	TNR_i	4.25	0.25	/			
Emgrand EV	中心频率/Hz	2 632	5736	/	13.71	13.96	6.39
	TNR_i	1.40	13.71	/			
BYD Qin EV	中心频率/Hz	872	2 592	5 312	5.67	8.71	6.98
	TNR_i	3.92	5.67	1.06			
BYD Song EV	中心频率/Hz	5 136	7 192	8 456	2.71	6.58	7.21
	TNR_i	2.71	1.33	1.22			

(a) 主观评价烦扰度与 TNR_{max} 值

(b) 主观评价烦扰度与Total TNR值

图4 主观评价烦扰度和客观测试指标相关性分析

声主观评价和客观测试试验方法,提取和计算了主观评价烦扰度和心理声学TNR指标。

(2) 首次将心理声学指标Total TNR值作为电动汽车车内电驱动噪声的声品质关键评价指标。分析发现,当车内噪声同时存在多个阶次噪声,且其TNR值差异不大时, TNR_{max} 不再适用,必须采用Total TNR表征车内电驱动噪声声品质特性。

(3) 相比于 TNR_{max} 值,Total TNR与主观评价烦扰度具有更好的相关性和拟合度,建立的电动汽车电驱动噪声声品质回归模型,其判定系数达到98%。

(4) 基于该车内电驱动噪声声品质回归模型,可以通过车内噪声客观测试数据,进行主观评价烦扰度的精准预测,对电动汽车电驱动噪声声品质的正向开发具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社,2002.
- [2] KIRAN G, GEORG E. Sound character of electric vehicles [C]. SAE Technical Paper 2011-01-1728, 2011, DOI: 10.4271/2011-01-1728.
- [3] HIROTAKA S, YOSHIHISA I, HIDEKI I, et al. Interior noise evaluation of electric vehicle: noise source contribution analysis[C]. SAE Technical Paper 2011-39-7229, 2011, DOI: 10.4271/2011-39-7229.
- [4] THOMAS W, TODD T, KIRAN G, et al. NVH Aspects of Electric Drive Unit Development and Vehicle Integration [C]. SAE Technical Paper 2019-01-1454, 2019, DOI: 10.4271/2019-01-1454.
- [5] 张守元,李玉军,杨良会. 某电动汽车车内噪声改进和声品质提升[J]. 汽车工程,2016,38(10): 1245-1251.
- [6] 徐忠四,承忠平,高立新,等. 电动汽车减速器啸叫噪声的双目标优化[J]. 汽车工程,2018,40(1): 76-81.
- [7] 马琮淦,左曙光,孙庆,等. 考虑时间谐波电流的永磁同步电机电磁阶次特征分析[J]. 振动与冲击,2014(15): 108-113.
- [8] 邱子桢,陈勇,康洋,等. 电动汽车驱动永磁同步电机声品质预测研究[J]. 噪声与振动控制,2020,40(2): 146-151.
- [9] GLENN P, WILLIAM S, TIMOTHY R, et al. Tonal annoyance metric development for automotive electric vehicles[C]. SAE Technical Paper 2019-01-1467, 2011, DOI:10.4271/2019-01-1467.

(下转第203页)