

· 研究报告 ·

语音清晰度和平均混响时间在车内声学的应用

程志伟[†]

(广州汽车集团股份有限公司 广州 511434)

摘要 乘用车的车内声学性能直接影响人的主观感受,但仅靠主观评价来判定是不够的;必须通过引入有力的客观参量来刻画车内听觉的舒适度效果。而如何来设计车内噪声试验方案来诊断和改善声学水平则成了一个重要的环节。在乘用车车内噪声品质的开发过程中,综合应用语音清晰度和平均混响时间两个指标对车内吸声性能进行了对比分析。通过对实车主观评价和客观测试,讨论了语音清晰度、车内平均混响时间、吸声系数和声压衰减斜率的概念及相互关系,从而确定了高速道路行驶工况下的语音清晰度主要取决于车内吸声材料的性能。提出了将车内相关部位进行材料吸声改进作为改善语音清晰度的主要措施之一。

关键词 语音清晰度, 平均混响时间, 吸声系数, 声压衰减斜率

中图分类号: TB533+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2014)06-0541-06

DOI:10.11684/j.issn.1000-310X.2014.06.010

Application of articulation index and mean reverberation time in sound absorber property evaluation for interior vehicle

CHENG Zhiwei[†]

(Guangzhou Automotive Group Co., LTD, Guangzhou 511434, China)

Abstract Acoustic performance of passenger car can affect directly people's subjective feelings. However, it is not enough to estimate the performance only by subjective understanding. So it is necessary to introduce some convictive physical parameters to describe and judge people's auditory sense in vehicle. Therefore, designing testing scheme becomes a key point to diagnose and improve acoustic characteristics of vehicle. In the development of passenger car's interior sound quality, two parameters, articulation index (AI) and mean reverberation time are compared and analyzed for full vehicle sound absorption characteristics in this article. After subjective estimation and objective test on the actual vehicle, the definition and relation among articulation index, interior mean reverberation time, absorption coefficient and the decay slope of sound pressure level (SPL) are discussed. It demonstrates that AI lied on vehicle's property of interior absorber materials when the car is running on high-speed road. Finally, some cases are proposed to modify the acoustic materials of relative parts, which is as one of the main methods of improving AI.

Key words Articulation index, Mean reverberation time, Absorption coefficient, SPL decay slope

1 引言

在汽车声学工程开发过程中,一般先根据市场竞争车型的车内声学表现来设定噪声技术指标体系。显然,车内声学性能直接依赖于人耳对声音事件的听觉感知过程,在这个过程中人对车内噪声同时做出主观感觉的判断。可是,对于汽车声学工程师而言,单凭主观评价汽车声学特性是不够的,因此,声学家们研究了很多客观声学参数来衡量声品质,为评价和改善汽车声学性能提供了重要的依据。应用在汽车声学上的物理量非常多,比如有:混响时间、响度、尖锐度、粗糙度、语音清晰度和掩蔽效应等。在对一款试验开发阶段的自主品牌车进行车内吸声改进中,结合语音清晰度和平均混响时间测量,找出了这两个指标跟参考车的差距,分析了其产生的原因,并验证了改进方案的效果。

2 基本概念

2.1 语音清晰度

语音清晰度^[1]这个概念是由美国科学家 Beranek 提出来的。它描述了在噪声环境下进行说话的清晰程度,语音清晰度用百分数来度量:100%表示说话完全听得清楚,0%表示说话完全听不清楚。说话是否听得清楚类似看字是否清楚一样。

评价汽车的噪声性能除了分析在人耳听觉范围内的声压级大小之外,还要详细比较声压级在各频率的分布情况,这就是引入语音清晰度(Articulation index,简称 AI)概念的目的。AI^[2]是在给定的语言通道和噪声条件下,表示对一个听音人获得语言信号清楚程度的有效比率,它是一个加权的分数,见表1,由测量的声压级频谱(相应于各个参考声压级(SPL_ref)和权重(Weight))可算出 AI。事实上,可能乘用车高速行驶工况下的噪声在人耳能感知的听觉范围内的声压级总值(Sound pressure level total,简称 SPL)跟同级别的竞争车型相差不大甚至还好,但人们在车内交谈或听车外的声音主观感到有困难,表现在客观数据即语音清晰度却相差较多,很明显,这将影响汽车的商品性能。而如何测量和计算语音清晰度,详见表1和图1。

表1 计算语音清晰度的参照表

Table 1 Reference table of AI computation

序号	频率(Hz)	参考声压级(dB(A))	权重
1	200	64	1
2	250	69	2
3	315	71	3.25
4	400	73	4.25
5	500	75	4.5
6	630	75	5.25
7	800	75	6.5
8	1000	74	7.25
9	1250	72	8.5
10	1600	70	11.5
11	2000	67	11
12	2500	65	9.5
13	3150	63	9
14	4000	60	7.75
15	5000	56	6.25
16	6300	51	2.5

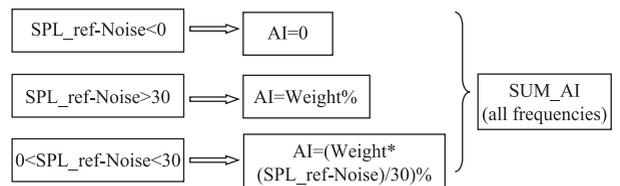


图1 语音清晰度计算流程图

Fig. 1 The flow diagram of AI computation

图1中,SPL_ref为参考声压级,Noise为实测的各频率下的声压级,Weight为权重。根据实测声压级值和参考声压级值之差的范围大小进行判断之后分别计算 AI 值;然后对表1中从200 Hz到6300 Hz所有各频率的 AI 计算结果求和,就能得到全部频率的 AI;亦即 SUM_AI(all frequencies)。

由以上计算程序可知,1000~4000 Hz共7个频段的权重之和占有所有16个频段权重的64.5%,超过了其余9个频段权重的总和;故 AI 的实用意义在于:即使试验车高速行驶工况下的噪声在其余9个频段的声压级跟参考车相近甚至还好;但若因中高频段如1000~4000 Hz的声压级较高,从听觉生理角度讲,人耳对该频段又最敏感,所以人们在车内主观感知交谈的效果会更差一些,客观数据则表现在所有频段200~6300 Hz的语音清晰度之和较小,越小就越不好,表明语音清晰度较差。

2.2 平均混响时间

在室内(封闭空间)声学中,混响时间有着重要的应用:其研究目的是为了获取良好的听音环境。试想如果受到室内混响的不良影响,进行语言交流有障碍,听不好,说不好,则表明室内的声学功能就存在缺陷了。汽车在实际使用过程中,车门和车窗等开闭件通常处于关闭状态,这样车内可近似为一个理想状态下的封闭空间;那么考察车内多个测点(一般前、后排左、右边座椅各两个,共四个)的平均混响时间(Mean reverberation time)对评价整车的声学环境将是一个主要的方面。

混响时间公式^[3]由美国物理学家 Sabine 给出,

$$T_{60} = 0.163V/A, \quad A = \sum_i S_i a_i, \quad (1)$$

式(1)中, V 为体积, A 为总吸声量, S_i 为材料吸声系数为 a_i 对应的面积, T_{60} 为混响时间,表示声音已达到稳态后停止声源,平均声能密度自原始值衰减百万分之一(60 dB)所需要的时间,单位为秒(s)。而声音衰减的快慢可以用衰减曲线^[4]来表示,它描述声源停止发声后室内声压级随时间衰减的图形。

实际测量过程中,一般采用所谓的中断声源法来测量混响时间,即激励室内的宽带或窄带声源中断发声后,采用直接记录声压级的衰减来获取衰减曲线的方法。假定在理想情况下,即声压级与时间呈线性关系^[5],并且背景噪声足够低。如式(2)和图2~3,根据声压衰减曲线及表达式可算出声压衰减斜率 SPL decay slope,其中 Y_{avg} 为声源声压原始值,它是声源声压衰减之前在车内的所有测点布置的传声器所接收的稳态噪声信号通过声学材料系统软件自动计算各频带声压值然后取的平均值,从式(2)和图1中还可得出声压从 Y_1 衰减到 Y_2 所用的时间。

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_{avg} - 5, \\ Y_2 &= Y_{avg} - 35, \\ \Delta Y &= Y_2 - Y_1. \end{aligned} \quad (2)$$

具体而言,混响时间和声压衰减斜率之间的关系可按式(3)计算:

$$\text{Reverberation time} = -60/\text{Slope}, \quad (3)$$

式中:Reverberation time——混响时间; Slope——声压衰减斜率。

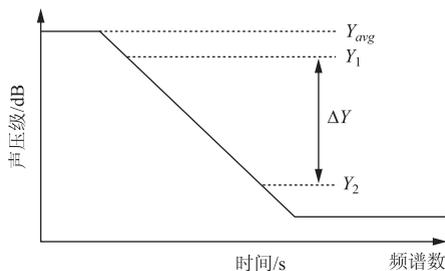


图2 某频段声压原始平均值 Y_{avg} 及衰减曲线

Fig. 2 Original mean value Y_{avg} and decay curve with sound pressure level at some frequency domain

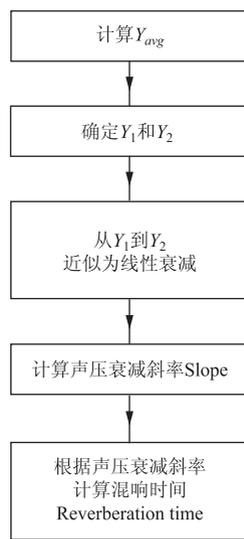


图3 混响时间计算步骤

Fig. 3 Computation procedure of mean reverberation time

2.3 吸声系数

如前所述,一方面车内平均混响时间可以通过实测得到;另一方面,由于车内体积恒定,而声学材料的表面积也可通过测量和计算得出;在体积和表面积已知的情况下,根据 Sabine 公式可立即确定混响时间 T 和吸声系数 a 的关系。

进一步地,按照文献[6]中的定义,在封闭空间内的两次反射之间的平均自由程 L 为: $L = 4V/S$,其中 V 为体积, S 为表面积;当 $a \leq 0.3$ 时,直接利用 Sabine 公式 $a = 0.041L/T$ 可算出吸声系数;而当 $a > 0.3$ 时,根据美国科学家 Eyring 对 Sabine 公式修正后的表达式 $a_{Eyr} = 0.041L/(-\ln(1 - a))$,可得出比 Sabine 公式更接近实际的结果。如图4,结合 Sabine 公式和 Eyring 公式以及混响时间的测量结果绘出曲线图,从而能直观地表示出车内材料吸声系数与混响时间的关系:混响时间

越长,则吸声系数越小。

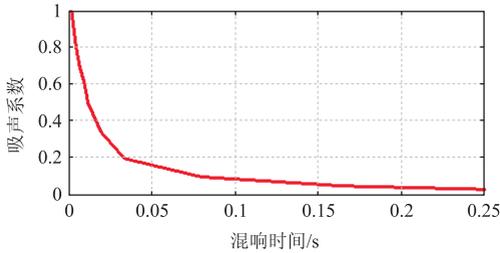


图4 吸声系数与混响时间的关系曲线

Fig.4 Relation curve between absorption coefficient and reverberation time

3 诊断分析

某自主样车概念设计阶段设定在沥青平直路面 120 km/h 匀速行驶工况下驾驶员外耳语音清晰度目标值为大于 54% ;样车试制出来并经整车气密性改善后高速行驶工况下在车内主观感觉风噪仍较明显,为此,重新与对标车进行比较,希望能找出差距和分析原因。

结合表 1 对图 5 进行频谱分析,中高频段比如 500 Hz 以上的声压级对语音清晰度的权重占的比例较大。试验样车和两台参考车驾驶员外耳测量值比较:样车和参考车 1 的声压级总值都约为 71 dB(A),但样车的语音清晰度即 AI 值只有 53.8%,比参考车 1 小了约 7%。再仔细分析 1/3 倍频程声压级频谱还发现,在 200 ~ 630 Hz 频率以内,参考车 1 的声压级基本上高于样车,但在 630 Hz 以上,样车的声压级都高于参考车 1;而 630 Hz 以上声压级对语音清晰度的权重影响比 630 Hz 以下的要大;这就清楚地解释了尽管样车和参考车 1 在全频段的声压级

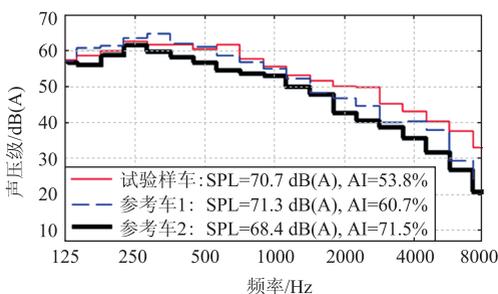


图5 匀速 120 km/h 道路行驶驾驶员外耳 SPL 和 AI
Fig.5 SPL and AI of driver's outer ear during running on asphalt road at 120 km/h

总值接近,但语音清晰度却比参考车 1 小得较多。而参考车 2 的声压级总值和语音清晰度分别为 68.4 dB(A)和 71.5%,是三台车中最好的,主观感受也印证了这一点。

三台车同样工况下同一个测点在中高频段的声压级大小各不相同,原因是否在于车内声压衰减的快慢不同呢,而声压衰减可能跟车内声学材料的吸声性能有关? 根据式(1),同级别车型车内容积 V 相差很小,那么吸声系数大的则车内平均混响时间就短。

为了证实这点,经过测量得到了三台车的声压级衰减曲线,如图 6。在采用同样的声源激励和测点布置的条件下,试验样车的原始平均声压值最大,声压衰减得也最慢,其次为参考车 1,衰减最快的是参考车 2。

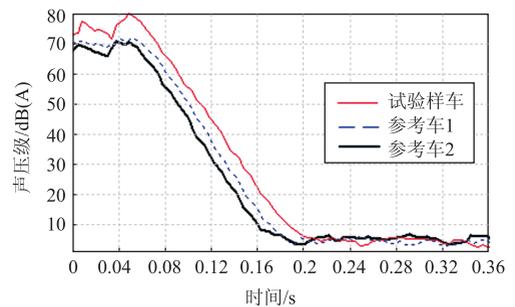


图6 声源中断法测量车内声压级衰减的结果

Fig.6 Interior SPL decay by sound source interrupt method

另外,还测量了三台车的车内平均混响时间,如图 7,在 500 Hz 以上,样车的平均混响时间约为 120 ms,最长;其次为参考车 1;最短的是参考车 2,约为 100 ms。

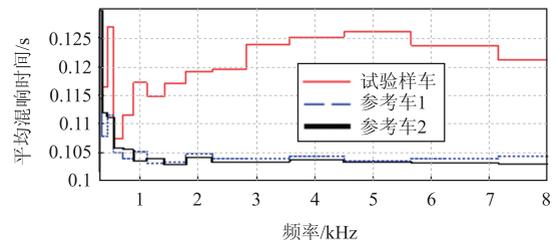


图7 车内平均混响时间试验结果

Fig.7 Interior mean reverberation time

根据图 6、图 7 及表 2,从声压衰减斜率和车内平均混响时间来看,样车跟两台参考车的差距都非常突出。

表2 车内声压衰减斜率和平均混响时间试验值

Table 2 Interior SPL decay and mean reverberation time

序号	试验车	声压衰减斜率	平均混响时间(s)
1	样车	-504.2	0.119
2	参考车1	-582.5	0.103
3	参考车2	-588.2	0.102

表3 车内吸声材料具体布置方案

Table 3 Layout about interior absorber materials

序号	实施部位及材料代号和参数	图示
1	前围声学材料, PU:600 g/m ² , 1.15 m ² /台;	
2	仪表台, PP:350 g/m ² , 0.20 m ² /台;	
3	行李箱地毯, PET:400 g/m ² , 0.70 m ² /台;	
4	行李箱左、右饰件, PP:300 g/m ² , 1.12 m ² /台;	
5	左右C柱后下方, PP:350 g/m ² , 0.18 m ² /台。	

4 方案验证

4.1 方案实施

如表3,在车内几个部位安装的吸声材料成型件及其代号(PU即Polyurethane聚氨酯,PP即Polypropylene聚丙烯,PET即Polyethylene terephthalate聚酯纤维)、克重和面积等参数。

4.2 效果验证

如图8,实测表明:例如在前围板内侧的声学材料采用PU发泡垫方案,同时厚度增加10mm之后,吸声系数在各主要频段的总体改善效果比较明显。

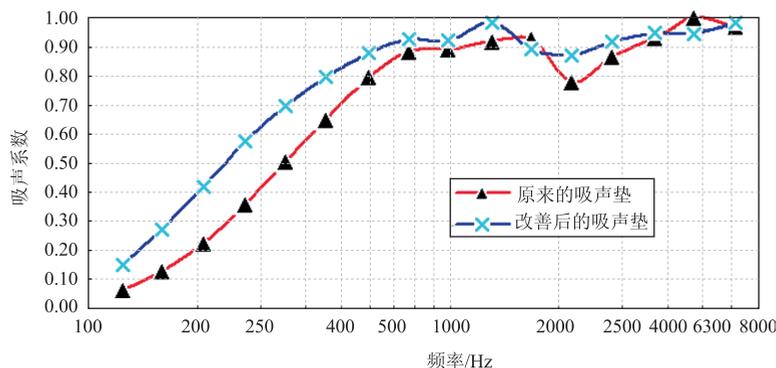


图8 声学材料改善前后的吸声系数频谱对比

Fig. 8 Absorption coefficient spectrum of both original and improved acoustic materials

再如表4,工程样车的吸声改进方案逐步对应实施后,在后续的PT1、PT2(Prototype test)试制样车及SOP(Start of production)量产车开始阶段,120 km/h 匀速行驶工况下语音清晰度有了很大改善:好于参考车1的60.7%,接近参考车2的71.5%,主观评价亦然。

表4 试验车各阶段改进后的车内声学试验结果

Table 4 Interior sound property of test vehicle during various stages

试验车阶段	PT1	PT2	SOP
声压级(dB(A))	71.6	70.2	69.4
语音清晰度(%)	59.2	63.0	68.5
声压衰减斜率	-530.9	-555.6	-576.9
平均混响时间(s)	0.113	0.108	0.104

5 结论

本文基于语音清晰度和车内平均混响时间等声学评价指标,分别进行了高速道路行驶工况下的风噪测试和定置工况下的车内声源中断法测试,并对声压衰减斜率曲线、吸声系数和混响时间的关系曲线做了详细的对比分析工作,主要结论如下:

(1) 考核高速行驶车内风噪的一个重要指标是语音清晰度,但根据人耳听觉的生理特点,优化车内声学材料在中高频段的吸声特性是改善风噪品质的主要途径之一;

(2) 在试车前,首先可在汽车定置工况下,通过对比和调整车内不同部位不同吸声系数的声学材料,来评价其对车内平均混响时间或与之相互联系声压衰减斜率等属性;

(3) 一方面汽车动态工况测语音清晰度,另一方面静态工况测平均混响时间,两者之间可以搭接

起一个桥梁,这对于改善车内的吸声性能可以共同起到有力的推动作用。

致谢 重庆大学褚志刚博士对本文给予了指导,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动—理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] GB/T 15485—1995, Acoustic-Methods for the calculation of the articulation index of speech[S].
- [3] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] GB/T 20247—2006/ISO 354:2003, Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room[S].
- [5] KUTTRUFF H. Room acoustics [M]. 4th Edition. London and New York; Elsevier Applied Science, 2000.
- [6] 赫尔姆特·富克斯. 噪声控制与声舒适[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.

· 声学新闻和动态 ·

2014年全国压电和声波理论及器件应用研讨会在北京召开

由 IEEE UFFC 分会、中国声学学会、中国力学学会发起的,中国科学院声学研究所和北京交通大学主办,宁波大学协办的 2014 年全国压电和声波理论及器件应用研讨会 (SPADWA 2014) 于 2014 年 10 月 30 日至 11 月 2 日在北京顺利召开。

全国压电和声波理论及器件应用研讨会是近年来发展迅速多学科交叉学术交流平台之一,是跨越声学、材料、力学、信息、甚至医学等多个学科、多领域的学术交流活动;以压电和声波器件的分析、设计和应用为背景,目标是促进理论与实践的更紧密结合,推动压电声波器件技术的创新。会议在声学及力学界已经形成了重要的影响和地位。

本次会议邀请了 9 位国内外压电和声波领域专家作大会报告,并邀请了 6 位产业界及学术界的专家参加大会论坛,与参会学者面对面交流。来自中、美、日、法、俄、伊朗六个国家的两百余位教授、专家、学生展开了充分交流。会议共收到 160 余篇论文摘要,涵盖了压电理论(包括微纳米压电理论)、声波理论(声面波、体波等)、压电器件设计与分析(谐振器、传感器、换能器、MEMS\NEMS\Nano 压电器件等)、压电材料、超声技术、压电器件的加工与制造技术、振荡器及滤波器的设计与制造、超声成像、给药与治疗技术等技术领域。

会议开幕式邀请了中国力学学会秘书长冯西桥教授、中国声学学会副理事长兼中国科学院声学研究所所长王小民研究员、美国罗格斯大学 Yook-kong Yong 教授作为嘉宾进行讲话。之后,日本千叶大学 Hashimoto 教授、法国 FEMTO-ST 研究所 Vincent Laude 教授、台湾国立大学 Yi-chung Shu 教授、美国罗格斯大学 Yook-kong Yong 教授、上海飞利浦袁建人教授、复旦大学他得安教授、中国科学院声学研究所何世堂研究员、台湾 TXC 公司赵珉江总经理、中科院纳米能源与系统研究所王中林院士等学者作了大会报告。

会议开展了别开生面的大会论坛,邀请了中科院声学所何世堂研究员、中国电子科技集团 26 所曹亮主任、上海飞利浦袁建人教授、浙江大学陈伟球教授、Skyworks 公司林真诚以及宁波大学王骥教授作为论坛嘉宾,为参会学者分享了学术及生活经验,并与参会学者进行互动,数位学者、专家踊跃登台,会场气氛异常活跃。

大会进行了学生论文竞赛报告,46 位学生作者参赛并作了精彩的学术报告,各位分会场主席也进行了认真的考核与评分,最后评选出 10 篇优秀论文,颁奖晚宴上为获奖者颁奖并合影留念。分会场的报告顺利结束后,大会成功落下帷幕。

(中国科学院声学研究所 田雯嘉)