

整车隔声量测试研究

张忠东^{1,2}, 吴洪亭¹, 黄显利^{1,2}, 刘鑫明^{1,2}, 王珂^{1,2}

(1. 中通客车股份有限公司, 山东 聊城 252022;

2. 山东省新能源客车安全与节能重点实验室, 山东 聊城 252022)

摘要:对整车声学包隔声量的常用评价指标进行对比分析,明确 PBNR 评价指标的优越性,并验证体积声源设备的操作及参数设置对评价结果的影响,为后续整车声学包隔声性能的正向开发、测试及评价提供参考。

关键词:隔声量; 整车 NVH; 声学包; 体积声源

中图分类号:U467.4⁺93

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)02-0049-04

Research on Sound Insulation Measurement of Vehicles

ZHANG Zhongdong^{1,2}, WU Hongting¹, HUANG Xianli^{1,2}, LIU Xinming^{1,2}, WANG Ke^{1,2}

(1. Zhongtong Bus Holding Co., Ltd., Liaocheng 252022, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Safety and Energy Conservation of New Energy Buses, Liaocheng 252022, China)

Abstract: The authors compare and analyze the common evaluation indexes of the sound insulation for the vehicle's acoustic package, clarify the superiority of the PBNR evaluation index, and verify the influences of the operation and parameter setting of the volumetric sound source equipment on the evaluation results, which provide a reference for the subsequent forward development test and evaluation of sound insulation performance of the whole vehicle acoustic package.

Key words: sound insulation; vehicle NVH; acoustic package; volumetric sound source

汽车声学包是汽车上阻隔噪声传播、吸收噪声和减振降噪部件的总称,是保证车内静音工程的关键手段之一,是影响汽车品质感的重要因素^[1]。在车辆的声学包开发过程中,通常会设定相关的声学指标,常用声学包评价指标包括隔声量 NR、声传函 ATF 以及基于声功率的隔声量 PBNR 等^[2-3]。本文在理论分析各评价指标的基础上,明确了 PBNR 较 NR 和 ATF 的优越性,并借助 LMS 测试系统(包括 LMS Test. lab 软件及数据采集前端设备)及中高频体积声源设备进行试验测试及数据计算,确定了测试及计算过程中的注意事项。

1 常用评价指标分析

为了明确常用声学包评价指标 NR、ATF、PBNR

之间的关系及评价合理性,建立如图 1 所示的“源—路径—响应”模型。图 1 中左侧区域代表声源舱,声源激励点的声压级设为 $p_{\text{源}}$;右侧区域代表驾乘舱,响应测点位置的声压级设为 p ;中间的传递路径为 STL。

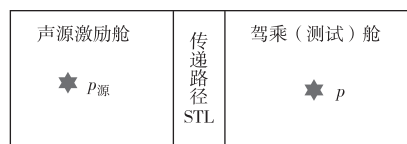


图 1 隔声系统示意图

1.1 隔声量 NR

隔声量 $NR = p_{\text{源}} - p$, 即响应点与激励点声压级的差。这种传统的 NR 可以用测试得到的声源及响应位置的声压级计算得到,方便计算且易于理解,但是由于声音的传递路径^[4]不唯一,而且 NR 的值随着声

收稿日期:2022-09-13。

第一作者:张忠东(1991—),男,硕士;主要从事客车 NVH 研究与性能提升工作。E-mail:zzdong1105@163.com。

源特性(如指向性和运行条件)、声源处的声压传感器安装位置和周围结构的变化而变化,因此上述计算方法是不可靠的。

1.2 声传函 ATF

基于体积声源设备,声传函 ATF 为响应点处的声压级 p 与体积声源体积加速度 Q 之间的传递函数^[5],可表示为 $ATF = p/Q$ 。声传函 ATF 曲线为直接测试得到,可以客观、准确地评价整车在各频率下的声音传递情况,但是其数据多、曲线复杂,不便于直观地对整车宽频段的综合隔声性能进行评价。

1.3 基于声功率的隔声量 PBNR

基于声功率的隔声量 PBNR 定义为点声源(对于单一声源,声源中心到测点之间的距离超过声源最大几何尺寸的 2 倍时,该声源可近似为点声源)的声功率 W 与响应(测试)点声压平方的比值^[6],其是 1/3 倍频程的函数,故可表示为

$$PBNR = W/(p \cdot p^*) \quad (1)$$

式中: p^* 是 p 的共轭, $(p \cdot p^*)$ 是声压的平方值,即声压的自功率谱。

已知点声源声功率可表示为

$$W = \rho(Q_a \cdot Q_a^*)/4\pi c \quad (2)$$

式中: $Q_a \cdot Q_a^*$ 是测量到的体积加速度的自功率谱,即体积加速度的平方; ρ 为空气密度; c 为声音在空气中的传播速度。

PBNR 也可以 dB 形式来表示^[5-7],其计算公式为

$$PBNR = 10 \log_{10} [(W/(p \cdot p^*)/R_{ef})] \quad (3)$$

式中: R_{ef} 为体积加速度参考值与声压参考值平方的比值,约为 1/400。

将 R_{ef} 的值 1/400 及式(2)代入式(3)中,并经推导得:

$$PBNR = 10 \log_{10} [Q_a \cdot Q_a^*/(p \cdot p^*)] + 10 \log_{10} [100\rho/(\pi c)] \quad (4)$$

因为 $Q_a \cdot Q_a^*$ 是测量到的体积加速度的自功率谱,即体积加速度的平方; $(p \cdot p^*)$ 是声压的自功率谱及声压的平方,进而 PBNR 的值可表示为

$$PBNR = 10 \log_{10} (Q_a/p)^2 + 10 \log_{10} [100\rho/(\pi c)] = -20 \log_{10} |p/Q_a| - 9.5 \quad (5)$$

式中:空气密度 ρ 及声传播速度 c 取环境温度为 20

℃ 的值,分别为 1.205 kg/m^3 、 343.2 m/s 。

综上,PBNR 比 NR 及 ATF 更加适合用于评价声学包的隔声性能。

2 试验验证

基于以上理论分析结果,对测试激励点与测点间的 ATF 及 PBNR 计算开展试验验证测试。如图 2 所示,测试基于 LMS 测试系统及中高频体积声源进行,体积声源作为点声源提供激励。因不具备消音室、半消音室等理想试验条件,本次试验选择了厂区内较为空旷地带进行,试验数据精度可能会受环境影响,但应该不会对结论判断造成困扰。



图2 LMS 测试系统(左)及体积声源(右)

2.1 台架试验

台架试验主要验证体积声源设备的发声特点及距离、角度、增益大小等对测试结果的影响。试验共布置 4 个声压传感器,分别位于体积声源发声管口正前方 650 mm 处、声源正前方 1 750 mm 处、声源侧方 90° 450 mm 处、声源侧方 45° 600 mm 处;试验设置声源信号为白噪声,发声次数为 100 次,即测试得到的 ATF 为发声 100 次测得的平均值。

试验结果分析如下:

1) 相关性对比。同组数据(试验中单次试验同时采集的各传感器数据为一组)下 4 个声压传感器测试信号与声源信号的相关性曲线如图 3 所示。从图 3 中可看出,远点位置相对其他 3 点位置受环境因素影响相关性有所下降,但整体来说,在 500~8 000 Hz 频段,测点位置与声源相关性达到 98% 以上且稳定性较好,在 500 Hz 以下及 8 000 Hz 以上频段,测点位置与声源相关性较 500~8 000 Hz 频段明显下降。基于此结论,为保证准确性,后续均采用 500~8 000 Hz 频段数据进行分析。

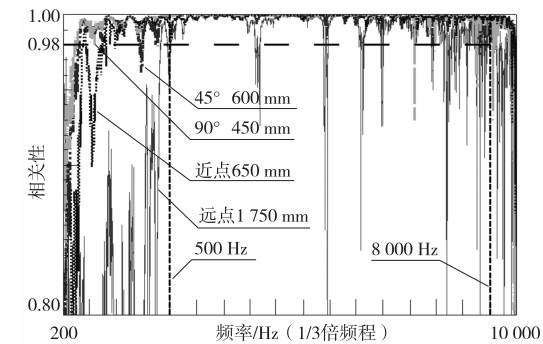


图3 各测点与声源信号相关性对比

2) 不同增益对声传函 ATF 的影响。分别采用 30%、50% 增益进行声传函测试, 将得到的声源至各测点的 ATF 曲线放置在一个坐标系中进行对比, 如图 4 所示, 可以发现 4 个声压传感器在不同增益下计算得出的 ATF 曲线吻合度极高, 说明在声源声压明显高于背景噪声的前提下, 增益大小对 ATF 几乎没有影响, 即测试时根据需要调节增益即可, 无需担心不同增益对试验结果的影响。

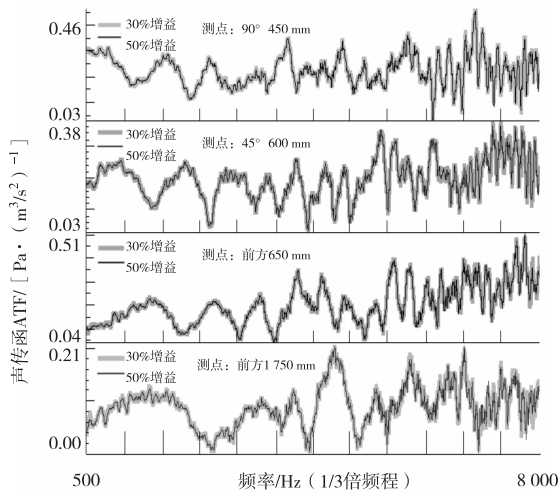


图4 不同增益下的 ATF 对比

3) 不同角度对声传函 ATF 的影响。对比同组数据下 4 个测点与声源间的 ATF 曲线, 计算得到 500~8 000 Hz 频率段的 ATF RMS 值见表 1。对比近点与远点 2 组数据可得距离对 ATF 影响较大(查阅资料得知测试点与声源距离每增加一倍, 声压相差 6 dB)。对比正前方近点、45°、90° 3 组数据可知该声源向各方向的传递较为均匀, 即表示测试时声源朝向不同对

数据带来的影响可以忽略。

表 1 500~8 000 Hz 频率段的 ATF RMS 值 $\text{Pa} \cdot (\text{m}^3/\text{s}^2)^{-1}$

测点位置	ATF RMS 值	测点位置	ATF RMS 值
90° 450 mm	0.24	近点 650 mm	0.2
45° 600 mm	0.22	远点 1 750 mm	0.1

2.2 整车试验

为验证实车测试时的声源及传感器布置对测试数据的影响进行整车试验, 测试地点同台架试验。车内传感器布置位置为驾驶员及前、中、后排乘客右耳处^[7-9]。将声源分别置于发动机舱内的发动机左侧、右侧、后侧、右前轮罩及右后轮罩处进行测试。

采集声源发声时与不发声时的车内噪声数据, 计算并对比两种状态下车内噪声的声压差, 差值大于 10 dB(A) 则证明试验数据有效。试验数据分析如下:

1) 声源在发动机舱内不同位置对车内噪声影响的对比。将测得的声源在发动机舱内不同位置到车内各测点的 ATF 曲线用式(5)换算为 PBNR, 取 500~8 000 Hz 频段计算 RMS 值, 统计结果见表 2。从表中数据可知发动机声源在舱内的布置位置对整车隔声量影响较小, 可以忽略不计, 测试时声源位置设置在合理位置即可, 不用考虑布置位置的差异对整车隔声量测试结果的影响。

表 2 发动机舱内不同位置到车内的 PBNR dB

测点位置	声源位置			均值
	左	右	后	
驾驶员	42.5	44.1	44.6	43.7
前排	45.8	46.7	46.2	46.2
中排	47.0	48.3	47.7	47.6
后排	49.0	49.6	49.0	49.2

2) 胎噪对车内噪声影响的对比。右前轮与右后轮至车内各测点位置的 PBNR 计算结果见表 3, 对比右前轮罩、右后轮罩对车内噪声的影响, 可确定胎噪对车内的影响跟距离有关, 也从侧面说明测试样车底

盘隔声较为均衡。

表 3 不同车轮到车内的 PBNR dB

位置	右前轮	右后轮	差值
驾驶员	42.6	46.7	4.1
前排	44.1	45.6	1.5
中排	44.8	44.9	0.1
后排	45.9	44.5	1.4

3) 互易性对比。将声压传感器与体积声源分别置于车内前排乘客右耳旁、发动机舱内发动机右侧位置,测试后交换位置再次进行测试。将测得的发动机舱到前排乘客右耳旁及前排乘客右耳旁到发动机舱的 PBNR 进行对比,在 500~8 000 Hz 频段的整体隔声量分别为 46.2 dB、47.1 dB,可确定互易性较高,即激励与响应位置互换对传递函数影响很小,可忽略不计。后续试验可采用在车内布置声源,在车外各关心位置布置传感器的测试方法,来减少测试次数、缩短测试周期。

2.3 主要结论

结合本次试验数据分析结果及近期查阅资料,主要结论如下:

1) 传统的 NR 测量是不可靠的,PBNR 更能体现系统的特性。

2) 中高频体积声源测试数据在 500~8 000 Hz 频带宽度范围较为可靠,超出部分可靠性下降。

3) PBNR 的计算范围一般在 200~10 000 Hz 的频带宽度,因此需使用低频声源与高频声源分别测试 1 次,测试完成后,使用 MERGE_FUNCTIONS 函数将 2 条 ATF 曲线合并为 1 条曲线,可进行 PBNR 的计算,但目前我司仅具备中高频体积声源,故仅能准确地计算出 500~8 000 Hz 范围内的 PBNR。

4) 系统的隔声性能为系统固有特性,其声传函 ATF 不受声源声压大小影响。

5) 声源可看作点声源,向各方向的传播较为均衡。

6) 发动机舱内声源布置的位置偏差对系统声传函数数据基本无影响。

7) 测试的互易性高,即激励与响应位置互换对传递函数影响可忽略不计。后续可考虑在车内布置声源,在车外各关心位置布置传感器来提高测试效率。

3 结束语

本文对整车声学包性能测试及分析方法进行了探讨分析,并通过试验的方法进行了验证。结果表明基于能量的隔声量 PBNR 更能客观、准确的评价整车 NVH 中的声学包隔声性能。可以为产品的声学包性能测试及评价提供参考,为声学包的正向开发提供支持。

参考文献:

- [1] 刘杰,王欢,汪三龙. 工程机械驾驶室隔声量仿真预测[J]. 机械科学与技术,2019,38(11):1720-1725.
- [2] 何剑杰. 基于能量的整车隔声量测量方法优化及应用[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.
- [3] 张立彬,蒋帆,王扬渝,等. 基于 LMS Test. Lab 的小型农业作业机振动测试与分析[J]. 农业工程学报,2008,24(5):100-104.
- [4] 庞剑,谌刚,何华. 汽车噪声与振动[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:245-276.
- [5] 谭祥军. 从这里学 NVH:噪声、振动、模态分析的入门与进阶[M]. 北京:机械工业出版社,2018:248-280.
- [6] 周铨,侯维玲,吴孟乔. 车内空腔声学模态试验与仿真分析[J]. 中国工程机械学报,2012,10(4):463-467.
- [7] 彭程,徐峰,孙敏,等. 基于整车声传函的声传函的声学包评价及应用[J]. 机械,2016,43(6):43-46.
- [8] 蔺磊,顾彦,潘雷. PBNR 测试方法的分析和优化[J]. 中国汽车,2019(10):40-43.
- [9] 刘宗财,刘岩,贾艳宾,等. 汽车车内噪声测试与分析[J]. 噪声与振动控制,2013(5):82-85.