

基于 $1/f^\beta$ 特征的路噪目标设定方法研究

余义

(上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西柳州 545007)

摘要: 为了克服传统路噪目标设定不合理及不能标准化的问题, 提出一种基于 $1/f^\beta$ 特征的路噪目标设定方法。先通过理论公式推导得出 $1/f^\beta$ 特征在 $1/3$ 倍频程图中的函数公式为 $P(n) = -2\beta n + A$; 然后运用回归分析法得出路噪符合 $1/f^\beta$ 特征且 $\beta \approx 1.5$, 越符合 $1/f^{1.5}$ 特征的路噪越舒适; 最后将 $1/f^\beta$ 特征运用于路噪目标设定中, 进行理论公式推导、流程设定和示例分解。

关键词: 汽车; $1/f^\beta$ 特征; 路噪; 回归分析; 目标设定

中图分类号: U461.99

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0008-05

随着新能源汽车的兴起及动力总成、风噪控制技术的提升, 路噪在 NVH(噪声、振动与声振粗糙度)问题中所占的比重越来越高。作为路噪开发体系的第一环节, 整车路噪目标设定还没有科学的方法, 开发合理、高效的路噪目标设定方法具有重大工程意义。

现在汽车行业内通行的路噪目标设定方法是对标车测试, 根据对标车路噪测试结果定义声压级、语言清晰度和频谱矩阵等指标, 其主要问题是没有理论基础及标准方法, 不同的人根据同样的数据设定的目标结果不一样。为了克服传统路噪目标设定中存在的问题, 实现目标设定的合理化和标准化, 该文基于噪声 $1/f^\beta$ 特征的基本理论推导符合路噪特点的 $1/f^\beta$ 特征模型, 利用路噪的 $1/f^\beta$ 特征进行路噪目标设定。

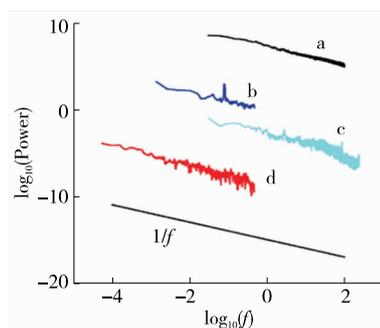
1 路噪 $1/f^\beta$ 特征

1.1 $1/f^\beta$ 特征

$1/f^\beta$ 特征是自然界普遍存在的一种统计特征, 其特点是信号的功率谱能量密度 $P(f)$ 随频率 f 增加而依幂律下降, 它们之间的关系满足式(1)。如图 1 所示, 光强信号、波浪的速度、音乐的声强、心跳频率的变化等均呈现 $1/f$ 特征。

$$P(f) = 1/f^\beta \times \lambda \quad (1)$$

Garcia-Lazaro J. 等的研究显示, 声音信号满足 $1/f^\beta$, 特别是 $\beta=1$ 时, 能驱动皮层感觉神经元更高的编码效率, 即当声音满足 $1/f^\beta$ 特征时, 大脑感觉越自然、越舒适; 反之, 则出现不适应感, 即声品质差。因此, 基于 $1/f^\beta$ 定制的噪声目标更符合声品质要求。



a为光强信号; b为波浪的速度; c为音乐的声强; d为心跳频率的变化。

图 1 自然界中普遍存在的 $1/f$ 特征

1.2 路噪 $1/f^\beta$ 特征

根据 E. Zwicker 等的研究, 人耳的听觉特性可近似由 $1/3$ 倍频程标准滤波器组来代替, 故路噪特征通常以路噪 $1/3$ 倍频程图为研究对象。图 2 为 $1/f^\beta$ 特征线的表述, 理论过程推导见式(2)。由图 2(c)可知: 按横坐标倍频程、纵坐标路噪的输出方式, $1/f^\beta$ 特征曲线为线性, 对路噪评估和目标设定具有极大的便利性。因此, 基于路噪 $1/3$ 倍频程图展开研究。

$$\begin{aligned} \text{dB}[P(f)] &= 20\log\left(\frac{1}{f^\beta} \times \frac{\lambda}{P_{\text{ref}}}\right) = \\ &= -20\beta\log(f) + 10\log\left(\frac{\lambda}{P_{\text{ref}}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)为路噪处理过程, 根据 $1/3$ 倍频程理论, 满足式(3):

$$f = 10^{n/10} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得:

$$P(n) = -20\beta\log(10^{n/10}) + A = -2\beta n + A \quad (4)$$

式中: n 为 $1/3$ 倍频的频带数, 关注频率 $25 \sim 10\,000$ Hz 的频带数为 $14 \sim 40$; β 为幂律指数; A 为常数。

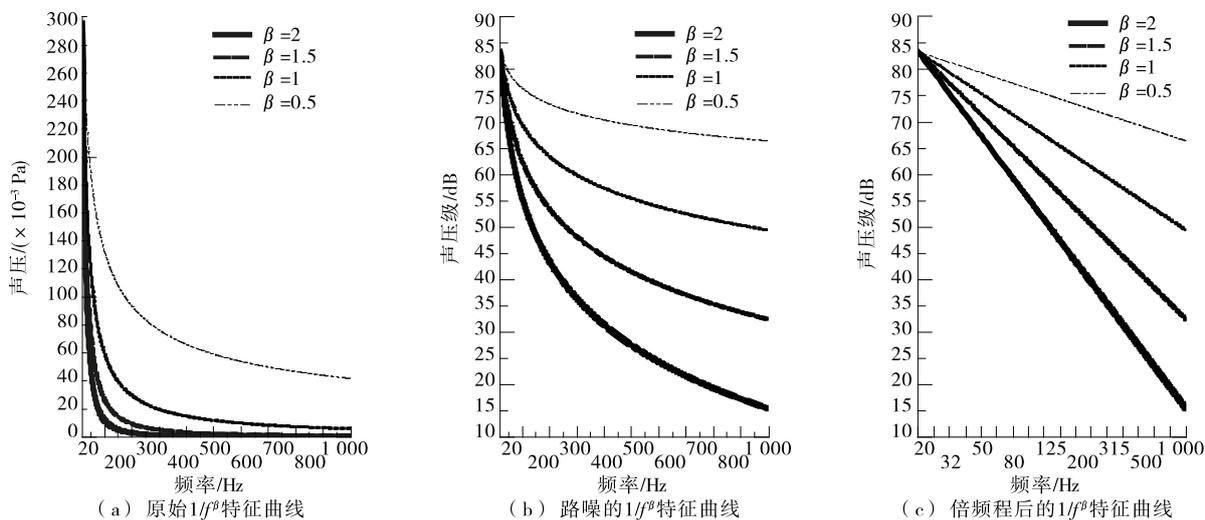


图2 $1/f^\beta$ 特征线的表述

为研究路噪特征,随机选取 11 辆车,共获取前、中、后排 26 组路面噪声数据(不计权),将其绘制在同一张 1/3 倍频程表上,并按同一起点绘制 $1/f^{0.5}$ 、

$1/f^1$ 、 $1/f^{1.5}$ 、 $1/f^2$ 特征曲线(见图 3)。由图 3 可知:路面噪声基本符合 $1/f^{1.5}$ 特性。下面采用回归分析法对此进行验证。

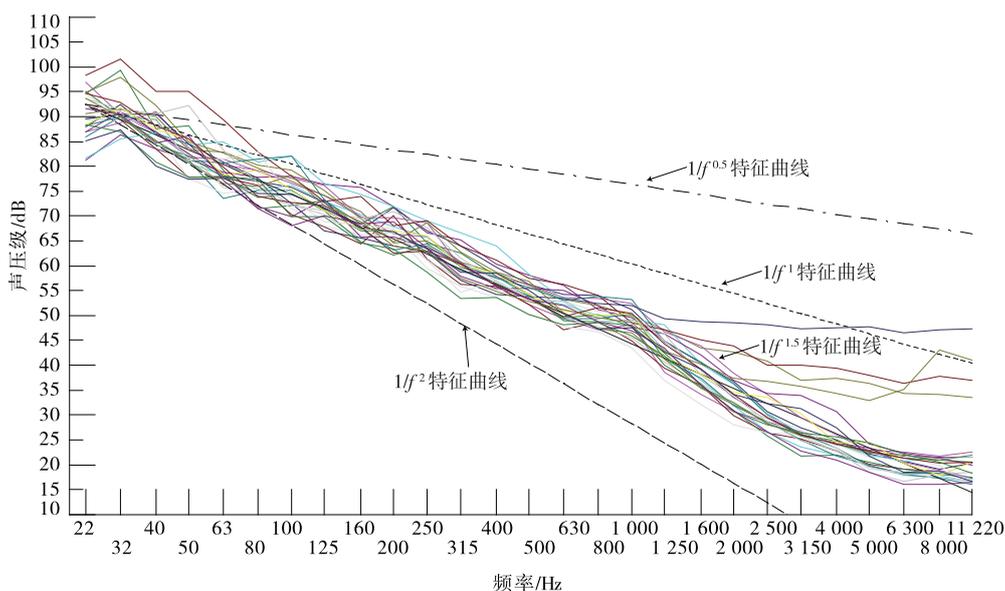


图3 路噪特征统计

对每组路噪数据进行一元一次线性回归,得到图 4 所示结果。由图 4 可知: $-2\beta = -3.0124$, $\beta = 1.5062$, $A = 133.19$ 。

将所有数据进行回归分析,结果见表 1 和图 5。相关系数 R^2 反映因变量的全部变动能通过回归关系被自变量解释的比例,即线性回归的拟合程度及声音分布成分的线性度。由表 1 可知:所有路噪的 R^2 平均值为 $0.9831 > 0.95$,说明路噪 1/3 倍频程具有很高的线性特征,满足 $1/f^\beta$ 特征; β 的平均值等于 1.463,离 1.5 很接近,且大多数组分布在 1.5 附

近,路噪特征基本符合 $1/f^{1.5}$ 特征。

将路噪按声压级大小排列,观察 $|\beta - 1.5|$ 和 R^2

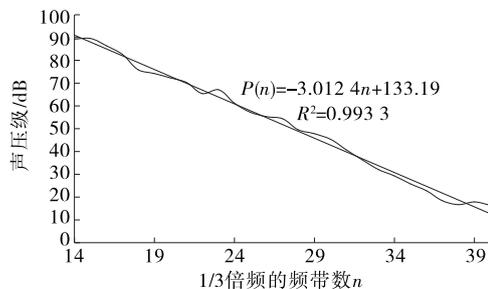
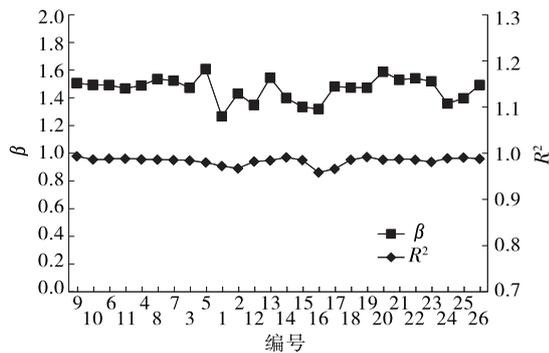


图4 一元一次线性回归结果

表1 回归分析结果

车型	前排			中排			后排		
	编号	β	R^2	编号	β	R^2	编号	β	R^2
后驱商用车	1	1.266 1	0.972 3	12	1.348 4	0.982 1	16	1.319 0	0.958 5
前驱两厢小车	2	1.430 9	0.967 2	—	—	—	17	1.482 0	0.966 0
前驱小 MPV	3	1.472 6	0.984 0	—	—	—	18	1.474 0	0.985 8
前驱 SUV	4	1.489 0	0.986 6	—	—	—	19	1.473 0	0.991 7
后驱商用车	5	1.607 8	0.980 0	13	1.545 2	0.984 3	20	1.588 0	0.985 8
四驱大 SUV	6	1.492 1	0.988 3	—	—	—	21	1.530 0	0.987 2
后驱两厢 SUV	7	1.524 3	0.985 2	—	—	—	22	1.541 0	0.985 6
纯电动汽车	8	1.535 4	0.986 1	—	—	—	23	1.519 0	0.981 1
前驱 B 级 SUV	9	1.506 2	0.993 3	14	1.399 0	0.991 1	24	1.359 0	0.989 0
前驱 B 级 MPV	10	1.493 0	0.986 4	—	—	—	25	1.396 7	0.990 5
后驱家用 SUV	11	1.467 7	0.988 1	15	1.291 4	0.985 1	26	1.492 0	0.987 9

图5 β 和 R^2 的统计分析

的变化趋势(见图6),发现 $|\beta-1.5|$ 的变化与声压级趋势一致, R^2 的变化与声压级趋势相反,说明越符合 $1/f^{1.5}$ 特征的路噪越舒适。

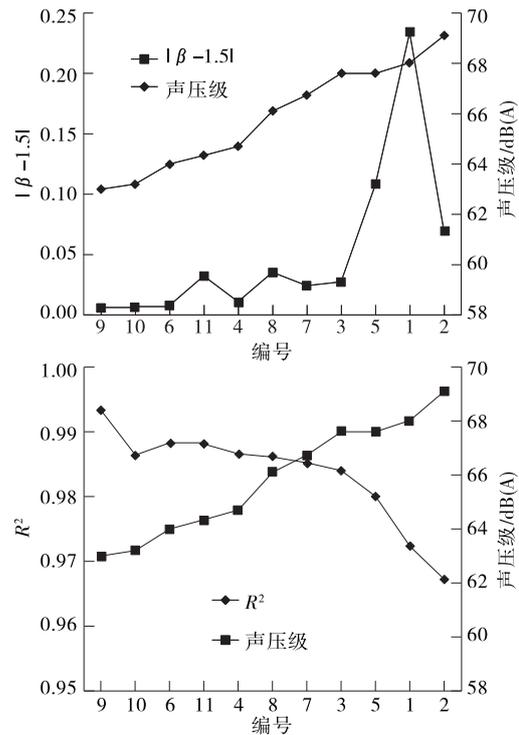
2 路噪目标设定

路面噪声的目标设定一般包括总声压级、语言清晰度和 $1/3$ 倍频程A计权声压级目标,以通用公司VTS(Vehicle Technical Specification,见图7)为例,总声压和语言清晰度都仅供参考, $1/3$ 倍频程矩形框才是路噪目标设定的核心。

路噪目标设定流程见图8,主要包括对标车路噪测试、声压级目标定义、频谱目标设定3个步骤。

2.1 路噪测试

路噪测试是NVH入门级测试,虽然简单,却是整个路噪目标设定的基础,如果做不到规范化,则后面流程的每一步只会扩大误差,造成整个路噪目标设定甚至路噪开发失败。

图6 声压级按大小排列的 $|\beta-1.5|$ 和 R^2 的变化趋势

路噪测试主要是在特定车速、特定路面采集乘员舱内特定位置噪声信号,其规范化主要包括控制路面、车速、麦克风布点的规范(见图9)。

2.2 总声压级目标设定

主要依据市场定位和对标车测试结果制定总声压级目标。整车项目开发初期市场部门定义清楚该车型属于哪一块市场细分、对标车型有哪些、路噪性能需达到领先(BIS)还是中游(BSA),之后基于市场

序号	位置	1/3倍频程各频带中心频率/Hz	低速平滑路面噪声/dB(A)	低速粗糙路面噪声/dB(A)
	xa. 前排座椅	25		
		31.5		
		40		
		50		
		63		
		80		
		100		
		125		
		160		
		200		
		250		
		315		
		400		
		500		
		630		
		800		
		1 000		
		1 250		
		1 600		
	2 000			
	2 500			
	3 150			
	4 000			
	5 000			
	6 300			
	8 000			
	10 000			
仅供参考	总声压/dB(A)		NA	
仅供参考	语音清晰度%		NA	

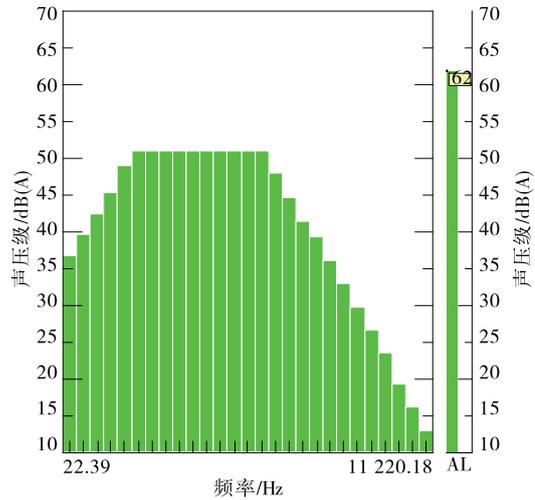


图7 GM路噪VTS目标



图8 路噪目标设定流程



图11 频谱目标设定流程



图9 路噪测试的规范化

定位和大量对标车数据将对标车前后排声压级和语言清晰度放入同一张表(见图10)中,设定总声压级目标和语言清晰度目标。如某项目定义在细分市场中路噪达到BSA水平,通过图10可定义出其前、后总声压级目标 $P(A) = 58 \text{ dB(A)}$ 。

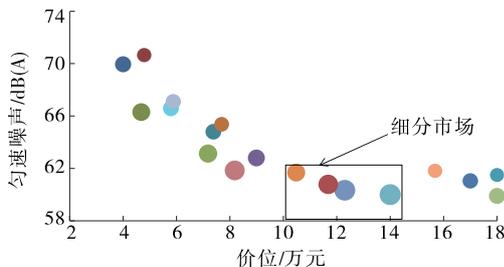


图10 总声压级目标设定

2.3 基于 $1/f^{1.5}$ 特征的频谱目标设定

频谱目标设定主要经过不计权总声压级目标设定、不计权频谱目标设定、加权频谱目标设定3个过程(见图11)。

由于目标为A加权值,而路噪 $1/f^{1.5}$ 特征是不计权的,路噪频谱目标设定的第一步是将A加权目

标转换为不计权目标, $1/f^{1.5}$ 特征下A加权值比不计权总声压级小30.4 dB(见图12),得到下式:

$$P(A) = P_{\text{总}} - 30.4 \quad (5)$$

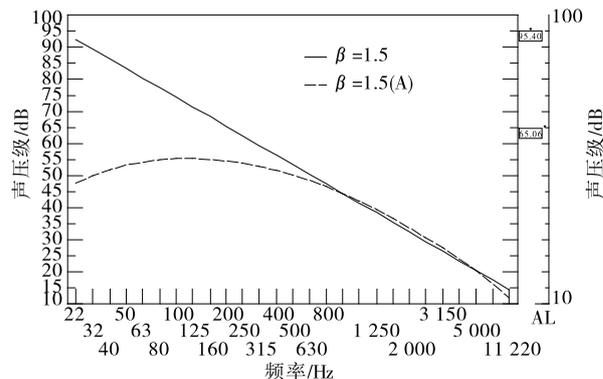


图12 A加权前后总声压级差

从图12可以看出: $1/f^{1.5}$ 特征目标曲线其实是一条斜率确定的直线。根据式(4)和路噪特征研究结果,可得:

$$P(n) = -2 \times 1.5n + A = -3n + A \quad (6)$$

目标线斜率为-3,目标设定过程主要是确定A值的过程,由总声压级计算公式可得:

$$P_{\text{总}} = 10 \times \log \sum_{n=14}^{40} 10^{P(n)/10} = 10 \times \log \sum_{n=14}^{40} 10^{(-3n+A)/10} \quad (7)$$

$P_{\text{总}} = P(A) + 30.4 = 88.4 \text{ dB}$,通过式(7),可反

求得 $A=127.33$, 则频谱目标线为:

$$P(n) = -3n + 127.33 \quad (8)$$

根据式(8)可得到 1/3 倍频程上各频带数的目标值, 将频谱目标值 A 计权, 得到 A 计权的频谱目标值(见表 2), 最终得到图 13 所示频谱目标曲线。

表 2 频谱目标参数

频带数	1/3 倍频程中心频率/Hz	频谱目标值/dB	A 计权/dB	频谱目标(A)/dB
14	25	85.33	-44.7	40.6
15	31.5	82.33	-39.4	42.9
16	40	79.33	-34.6	44.7
17	50	76.33	-30.2	46.1
18	63	73.33	-26.2	47.1
19	80	70.33	-22.5	47.8
20	100	67.33	-19.1	48.2
21	125	64.33	-16.1	48.2
22	160	61.33	-13.4	47.9
23	200	58.33	-10.9	47.4
24	250	55.33	-8.6	46.7
25	315	52.33	-6.6	45.7
26	400	49.33	-4.8	44.5
27	500	46.33	-3.2	43.1
28	630	43.33	-1.9	41.4
29	800	40.33	-0.8	39.5
30	1 000	37.33	0.0	37.3
31	1 250	34.33	0.6	34.9
32	1 600	31.33	1.0	32.3
33	2 000	28.33	1.2	29.5
34	2 500	25.33	1.3	26.6
35	3 150	22.33	1.2	23.5
36	4 000	19.33	1.0	20.3
37	5 000	16.33	0.5	16.8
38	6 300	13.33	-0.1	13.2
39	8 000	10.33	-1.1	9.2

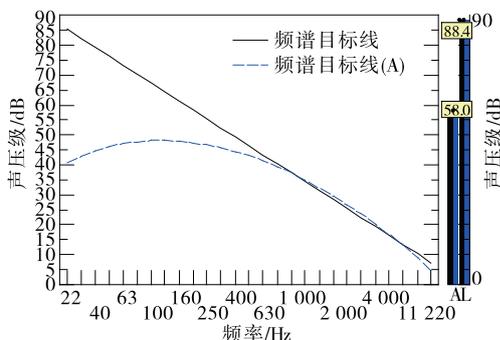


图 13 频谱目标线

基于 $1/f^{1.5}$ 特征设定的路噪目标线, 一方面更符合声音的本质, 另一方面因为有理论根据, 可实现路噪目标设定标准化。图 14 为频谱目标示例, 从中可见, 采用文中方法确定的目标线, 基于对标车测试的结果定制, 却不会将对标车的问题点带入目标, 能更准确地反映对标车的水平。

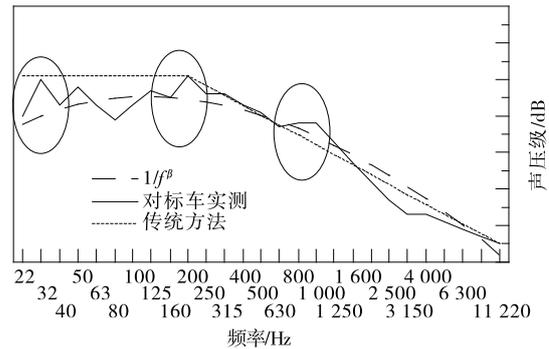


图 14 频谱目标示例

3 结论

该文对路噪 $1/f^\beta$ 特征进行分析, 利用回归分析研究路噪的 $1/f^\beta$ 特征并将其运用于路噪目标设定中。回归分析发现路噪特征符合 $1/f^{1.5}$ 特征, 为后续其他噪声的研究提供了一种新思路, 对低频路噪声品质研究具有一定启示。对数据的重新编码排列发现 $|\beta-1.5|$ 与声压级趋势一致, R^2 与声压级趋势相反, 说明越符合 $1/f^{1.5}$ 特征的路噪越舒适, 也说明统计学的指标对路噪评估具有一定借鉴意义。将 $1/f^{1.5}$ 特征运用于路噪频谱目标设定中, 完成频谱目标设定的公式推导和操作流程, 对路噪目标的设定具有指导意义, 基于 $1/f^{1.5}$ 特征的路噪目标设定比传统方法更标准、更便捷。

包括路噪在内的所有车辆噪声的 $1/f^\beta$ 特征是一个新的研究命题, 具有很高的研究意义和应用价值, 由于作者能力有限且研究较浅, 有很多有价值的地方没能拓展或深挖, 如 β 的更精确值、统计指标与路噪关系、路噪声品质研究、 $1/f^\beta$ 特征与其他声品质指标之间的关系等, 还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 范博强, 何裕嘉, 于玉国. 自然界信号的 $1/f$ 特征和感觉神经系统响应特性[J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(4).
- [2] Garcia-Lazaro J, Ahmed B, Schnupp J. Tuning to natural

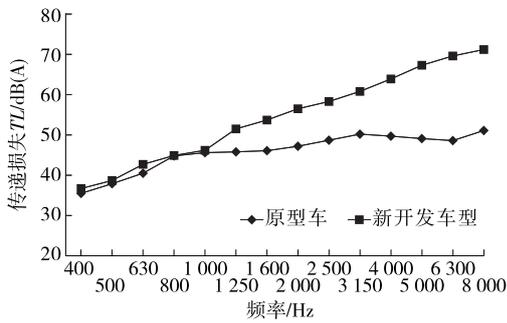


图 18 优化前后整车防火墙总成传递损失对比

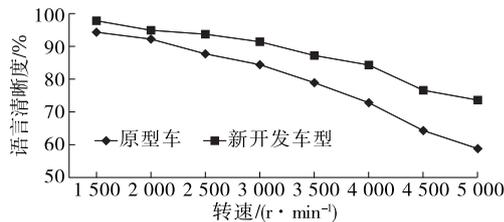


图 19 优化前后整车全油门加速工况语言清晰度对比

下结论:

(1) 混响室一半消声室法是一种分析过孔件密封及搭接结构优劣的有效方法,可准确指示影响过孔件隔声性能的薄弱环节,采用该方法对防火墙过孔件进行隔声测试,可在工程实践中快速实施可行性方案,验证过孔是密封问题还是隔声不足。

(2) 防火墙过孔的隔声水平对整车的声品质至关重要,通过试验积累各车型的工程经验和数据,能有效促进新车型的正向开发。

(3) 过孔件的密封搭接尺寸及结构是解决隔声问题的基础,一个好的密封搭接方案才能确保过孔件优良的隔声性能。

参考文献:

[1] 邓江华,宋俊,李灿,等.乘用车声学包设计开发与优化

技术研究[J].声学技术,2015,34(4).

[2] Liangyu Huang, Pamkumar Krishnan. Development of a luxury vehicle acoustic package using SEA full vehicle model[R]. SAE Technical Paper, 2003.

[3] Norimasa Kobayashi, Hisanori Tachibana. A SEA-based optimizing approach for sound package design[R]. SAE Technical Paper, 2003.

[4] 邓江华.前围总成特性对汽车声学包性能影响[J].噪声与振动控制,2014(3).

[5] 唐荣江,李申芳,郑伟光,等.利用混合 FE-SEA 方法的前围隔声性能优化设计[J].应用声学,2019,38(1).

[6] 姜东明.汽车前围声学包吸隔声性能分析及优化[D].成都:西南交通大学,2018.

[7] 邓江华,宋俊.基于统计能量方法的乘用车声学包设计开发与优化[A].2013 中国汽车工程学会年会论文集[C].2013.

[8] 陈书明,王登峰,宋学伟,等.基于 FE-SEA 混合方法的声腔内部噪声预测[J].振动与冲击,2010,29(10).

[9] 刘宏玉,张军,章晓轩,等.整车隔声性能评价分析体系的研究[A].2015 中国汽车工程学会年会论文集(Volume4)[C].2015.

[10] 王少黎,李余格,金波.声学包装技术在某车型 NVH 提升中的应用[J].客车技术与研究,2017(5).

[11] 卓建明.某客车行驶车内轰鸣声分析与改进[J].客车技术与研究,2016(2).

[12] 罗竹辉,贺才春,罗仵科,等.内前围隔音垫隔声性能研究[J].振动与冲击,2018,37(7).

[13] 吴茵.某纯电动 MPV 车内中高频噪声分析与声学包优化[D].长沙:湖南大学,2017.

[14] 张守元,李玉军,杨良会.某电动汽车车内噪声改进与声品质提升[J].汽车工程,2016(10).

[15] 邓江华.防火墙总成特性对汽车声学包性能影响[J].噪声与振动控制,2014,34(3).

收稿日期:2019-04-02

(上接第 12 页)

stimulus dynamics in primary auditory cortex[J].Current Biology,2006,16(3).

[3] E Zwicker, H Fastl. Psychoacoustics: facts and models [M]. Berlin: Springer, 1990.

[4] Matthew Harrison. 如何将汽车制造成精品: 汽车噪声与振动控制[M]. 李惠彬, 上官云飞, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[5] 赵攻, 周海亭, 陈光冶, 等. 机械振动与噪声学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[6] 吴东, 汪阳. HK6909H 客车车内噪声控制改进[J]. 客车技术与研究, 2016(1).

[7] 雷龙, 居晓华, 余英俊, 等. 客车骨架设计缺陷引起的急速低频噪声问题[J]. 客车技术与研究, 2016(3).

[8] Beranek L L. Noise and vibration control [R]. Institute of Noise Control Engineering, 1998.

[9] 成传胜, 赵德云. 某车型整车路噪轰鸣分析优化及试验研究[J]. 汽车零部件, 2018(12).

收稿日期:2019-04-22