

◇ 研究报告 ◇

时域传递路径分析在路噪声品质开发中的应用*

毛 杰^{1,2,3†} 陈志东³ 邱 毅² 周昌水³ 张亚楠³ 姚再起³

(1 浙江吉利控股集团有限公司汽车工程学院 杭州 310000)

(2 浙江大学能源工程学院 杭州 310027)

(3 吉利汽车研究开发宁波有限公司 宁波 315336)

摘要: 基于某 SUV 在 30~40 Hz 频段的路噪声品质问题,采用时域传递路径分析方法进行了问题的研究,并通过传递路径分析分解确定主要贡献来自于后副车架安装点的 Z 向。采用 CAE 方法完成了主路径噪声传递函数的优化,通过尾门的结构优化降低噪声传递函数,使得 30~40 Hz 的路噪降低了约 4 dB。采用声音回放技术完成了 CAE 优化方案的主观评价,评价通过后再进行实车验证,提高开发效率。

关键词: 时域传递路径分析;路噪;声品质;试验-仿真混合法

中图法分类号: TB532

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2022)05-0815-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2022.05.017

Road noise sound quality development by time-domain transfer path analysis

MAO Jie^{1,2,3} CHEN Zhidong³ QIU Yi² ZHOU Changshui³ ZHANG Yanan³ YAO Zaiqi³

(1 Zhejiang Automotive Engineering Institute, Zhejiang Geely Holding Group, Hangzhou 310000, China)

(2 College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(3 Geely Automobile Research Institute, Ningbo 315336, China)

Abstract: For a road noise sound quality issue of an SUV, time-domain transfer path analysis (TPA) was used to study the issue. TPA composition was introduced to determine that the issue was mainly contributed by the rear subframe from the Z direction. Then CAE technology was adopted to analyze root cause of noise transfer function (NTF) peak of main contribution paths. The NTF peak was reduced by the tailgate structure optimization, which decreased 4 dB for the road noise in 30–40 Hz. Sound playback technology was used to subjectively evaluate the CAE optimization design. Then the tailgate optimization was validated by experiment, which improved the development efficiency.

Keywords: Time-domain transfer path analysis; Road noise; Sound quality; Hybrid test-CAE method

2021-08-04 收稿; 2021-11-30 定稿

*国家重点研发计划项目 (2020YFB1709400)

作者简介: 毛杰 (1987–), 男, 浙江余姚人, 博士, 研究方向: 整车 NVH 仿真开发与控制。

†通信作者 E-mail: maojie1987@zju.edu.cn

0 引言

当车辆以 60 km/h 或 80 km/h 匀速行驶在粗糙路面时, 内燃机噪声和风噪一般不是主要的噪声源, 而路面不平顺度经过轮胎和悬架传递到车身引起的结构噪声(路噪), 以及轮胎与路面相互作用引起的空气噪声(胎噪), 是该工况下最易引起客户抱怨的 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 问题。其中, 在汽车 NVH 开发领域, 路噪与轮胎的力传递、悬架的选型、车身的设计强相关, 而胎噪与轮胎的花纹设计、车身的声学包设计强相关。在当前的乘用车市场上, 随着电动汽车的快速发展, 在缺少内燃机对低频噪声的掩蔽效应后, 以结构声为主的路噪一直是售后抱怨的痛点。

在路噪的研究方面, Lee 等^[1]扫描了路谱, 以强迫振动的形式加载到轮胎与路面的接触面上, 激励整车有限元模型(包含轮胎)计算路噪。黄剑锋等^[2]采用传递路径分析(Transfer path analysis, TPA)技术进行了从整车到部件的路噪问题诊断和优化。Baro 等^[3]建立了一个线性轮胎模型用于预测 200 Hz 附件轮胎空腔声的机理, 用于降低空腔声经悬架结构传递到车内的噪声。

主机厂在车型仿真开发阶段, 重点工作集中在频域范围内的路噪声压级上, 只能等到试验样车调校阶段才能开展主观评价(又称路噪的声品质评价)。而根据心理声学理论, 声压级的降低和声品质的改善之间并不存在绝对的关联。换言之, 仿真阶段一味地追求声压级的降低, 在一定程度上会引起过设计现象, 并且无法确保对于后续样车的声品质带来收益。

因此, 基于项目开发中的痛点问题, 本文采用时域 TPA(Time-domain TPA)方法, 搭建了某乘用车的 NVH 仿真-测试混合 TPA 模型, 可以实现噪声的回放、编辑以及仿真方案的主观评价, 在一定程度上缩短开发周期、降低设计变更成本以及减少人力投入。

1 时域 TPA 简介

TPA 目前已广泛应用于汽车 NVH 的开发工作中^[4-5], 对于识别振动或噪声问题的关键路径、提出针对性的优化方向, 具有直接且有效的作用。

常见的 TPA 分为频域和时域两种, 本文对它们的优缺点和应用场景做一个简单的介绍。频域 TPA 用工作载荷的频谱乘以传递函数的频谱, 得到该条路径的频域贡献量, 最后通过矢量叠加所有结构声和空气声贡献路径得到车内总噪声, 如式(1)所示:

$$p_{\text{driver}}(f) = \sum_{i=1}^N H_i^{\text{SB}} F_i(f) + \sum_{j=1}^M H_j^{\text{AB}} Q_j(f), \quad (1)$$

式(1)中: f 表示频率; $p_{\text{driver}}(f)$ 表示频域下的驾驶员耳旁声压; i 和 j 分别表示结构声 (Structure-borne, SB) 和空气声 (Airborne, AB) 的贡献路径数量; H_i^{SB} 和 H_j^{AB} 分别表示第 i 条结构声传递函数和第 j 条空气声传递函数; F_i 和 Q_j 分别表示第 i 条结构声传递路径的力载荷和第 j 条空气声传递路径的声载荷。

在进行汽车 NVH 开发时, 频域 TPA 可以快速把问题频率下的振动或噪声问题的主要贡献路径识别出来, 进而再识别该贡献路径的主导因素是激励源还是传递函数, 最后可以开展针对性的优化工作。频域 TPA 的缺点在于无法进行声音的回放和评价。

而时域 TPA 用工作载荷的时域时间与传递函数的逆快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 做卷积, 得到该条路径的时域贡献量, 如式(2)所示:

$$p_{\text{driver}}(t) = \sum_{i=1}^N H_i^{\text{SB}}(t) * F_i(t) + \sum_{j=1}^M H_j^{\text{AB}}(t) * Q_j(t). \quad (2)$$

式(2)中各变量定义同式(1)。

时域 TPA 方法在汽车 NVH 开发中具有广泛的应用价值, 比如: (1) 内燃机车型的启动/熄火是一个瞬态工况, 适合从时域上进行分析和优化; (2) 声音的回放功能可以减少实车调教过程中的“试错”次数, 提高开发效率, 同样需要适合从时域上进行结构声和空气声的分析和优化。

2 路噪声品质问题简介

在车辆匀速行驶在粗糙路面上时, 在不同的频段内易引起不同的路噪声品质抱怨, 如轰鸣声 (20 ~ 50 Hz)、敲鼓声 (70 ~ 90 Hz)、隆隆声 (100 ~ 160 Hz)、轮胎空腔声 (180 ~ 250 Hz), 相关描述如表 1 所示。需要说明的是: (1) 上述问题频段

的定义在不同的主机厂会略有差异,但不影响路噪问题的表述;(2) 轮胎空腔声以单频噪声问题为主,表1中所示频段较宽(180 ~ 250 Hz)的原因是根据轮胎尺寸、车速、温度等差异,空腔单频噪声会在200 Hz上下偏移;(3) 300 Hz以上胎噪问题不在本文的讨论范围内。

图1是某SUV在粗糙路面以60 km/h匀速行驶时的驾驶员耳旁路噪时域和频域结果,其中由

表1 常见的路噪声品质问题

Table 1 Common road noise sound quality issues

路噪问题	问题频段/Hz	主观感觉
轰鸣声	20 ~ 50	压耳感
敲鼓声	70 ~ 90	发闷感
隆隆声	100 ~ 160	烦躁感
轮胎空腔声	180 ~ 250	单频感

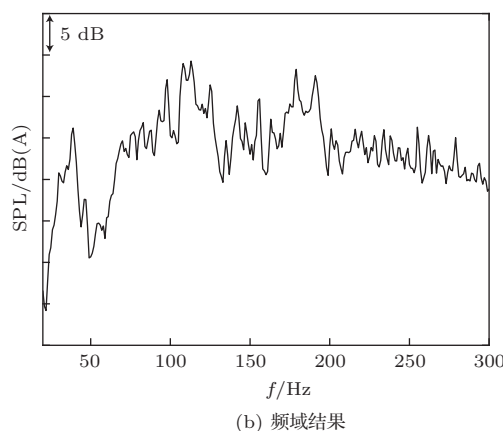
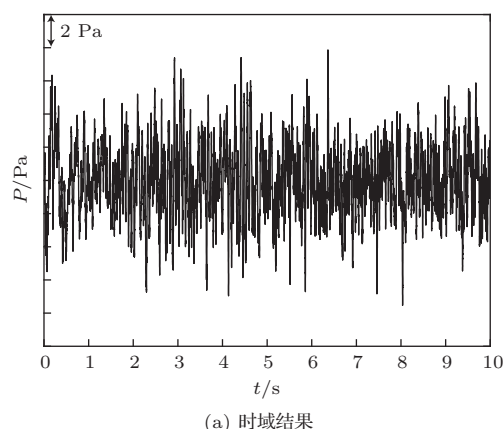


图1 某SUV车内路噪时域和频域曲线

Fig. 1 Interior time-domain and frequency-domain road noise curve of an SUV

图1(b)可以看到与表1相对应的路噪问题。其中,在20 ~ 50 Hz频段内,因声压级幅值高、低频声能集中,在行驶过程中引起了明显的低频压耳感的路噪声品质抱怨,亟需对该问题展开分析和优化。

3 路噪声品质仿真和优化

基于路噪声品质的开发需求,本文首先采用时域TPA方法对某SUV的路噪声品质问题进行复现,锁定关键贡献路径和问题频段,接着采用CAE方法对特定频段的子系统进行优化。

3.1 基于时域TPA的问题复现

目前,基于整车路噪仿真技术,可以完成从路面载荷提取到车内噪声计算的全流程分析。然而,单纯依赖于仿真手段,在实际项目开发过程中常会遇到以下场景:

(1) 整车有限元模型在20 ~ 300 Hz频段内的仿真精度问题。整车路噪仿真方法一般有2种常用的方法,一是路面不平顺度加载到轮胎模型的方法,二是直接提取轴头力加载到车轮中心的方法。虽然以上方法已经较为成熟,但是在实际应用时,轮胎、悬架、车身等有限元模型在不同频率下均会产生一定的误差,从而影响仿真结果和问题判断的精度,尤其是在100 Hz以上,这种误差会逐步突显出来,需要耗费大量的时间去获取准确的输入、对标各问题频率下的有限元模型精度等。

(2) 通过上述仿真方法得到的频域路噪结果,因缺乏时域信号而无法进行声音回放,所以路噪优化工作只能通过降低声压级开展,无法建立起仿真优化方案和主观评价直接的联系,易引起过设计的现象。

因路噪激励特性和传递路径较为复杂,若不借助于有效的问题诊断手段,只能在实车上通过试错的方式进行问题排查,效率低且成本高。基于现有仿真技术的瓶颈,本文采用仿真和试验混合的方法,进行路噪低频压耳感问题的复现和优化:

(1) 采用时域TPA方法进行路噪声品质问题的诊断分析。该方法的优点在上文理论部分已经介绍,不仅可以实现传统TPA方法对于车内噪声主要贡献路径的识别,还可以实现声音的回放。

(2) 采用CAE方法对主要贡献路径的问题进行针对性优化,并且将优化的结果替换到时域TPA

模型中,实现优化方案的回放,减少大量试错和方案试制的时间。

(3) 在平台化造车的时代,基于平台第一款车型上完成(1)和(2)的工作后,可以对后续车型的开发效率提升提供帮助。

本文搭建的某SUV路噪声时域TPA模型如图2所示,主要包含由螺旋弹簧、前减振器和前副车架组成的前悬架路噪,以及由后减振器和后副车架组成的后悬架路噪。将前后悬架的路噪结果进一步合成后,可以得到时域的车内路噪结果,不仅可以

接将时域结果回放进行主观评价。需要说明的是,300 Hz 以下的路噪是结构声强相关的噪声,可以忽略空气声的影响。因此,本文在提取路噪 TPA 的路径的时候,只需要考虑结构声传递函数 HiSB 即可(如图2所示)。提取的过程是通过工况传递路径分析(Operational transfer path analysis, OTPA)多工况拟合的方式,即获取不同工况下的底盘激励结果和车内噪声响应结果,然后通过 OTPA 自带的传函拟合算法,即算法中默认每一条底盘硬点到车内的传递函数是固定的,从而通过多个工况的测试结果矩阵计算得到每一条传递函数结果。

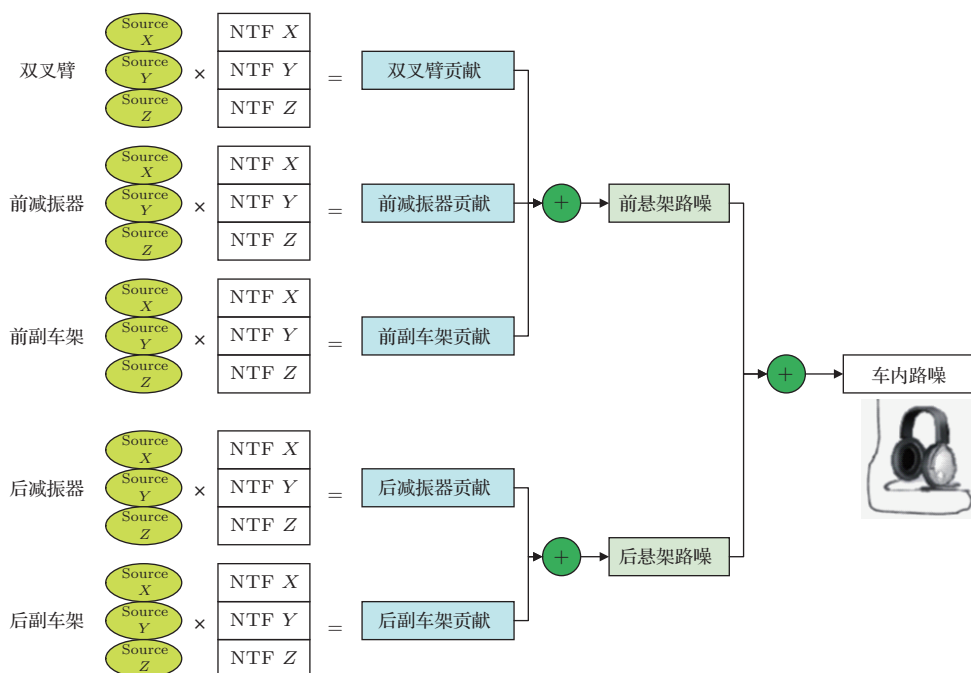


图2 路噪声品质时域TPA分析

Fig. 2 Time-domain TPA analysis of road noise sound quality

为了确保时域TPA分析的准确性,需要对比它和车内传声器测试结果的一致性,如图3所示。从图3(a)中可以看到,在0~10 s时域内,时域TPA合成路噪和车内传声器测试路噪的时域声压曲线基本重合;在20~300 Hz频段内,时域TPA合成路噪和车内传声器测试路噪的一致性较好,从而证明了TPA模型和结果的有效性,可以用于路噪声品质问题的排查、分析和优化。需要说明的是,图3(b)的频域结果在75~100 Hz区间内相对其他频段存在较大的误差,这主要是因为测试过程采用了时域TPA中的工况TPA方法,测试效率更高,但是会损失一部分精度。而该误差对于图3(a)中的两个时域压耳声品质的主观评价几乎没有影响。因此,在工程应

用时,建议通过前后测试多个稳态和瞬态工况,如不同车速的匀速工况、怠速工况、节气门全开/半开加速工况等,通过多工况的相互耦合,提升工况TPA对于传递函数求解的精度,从而提升车内噪声拟合结果的精度。

将时域TPA合成的路噪结果在声品质评价试验室内组织主观评价,选取了10名不同年龄、性别的评价人员,主观评价路噪低频压耳感得分为6.5分,目标7分。

3.2 基于时域TPA的问题分析

基于准确的TPA结果,可以快速实现噪声贡献路径的合成和分解,从而确定路噪低频压耳感问题的主要贡献路径。

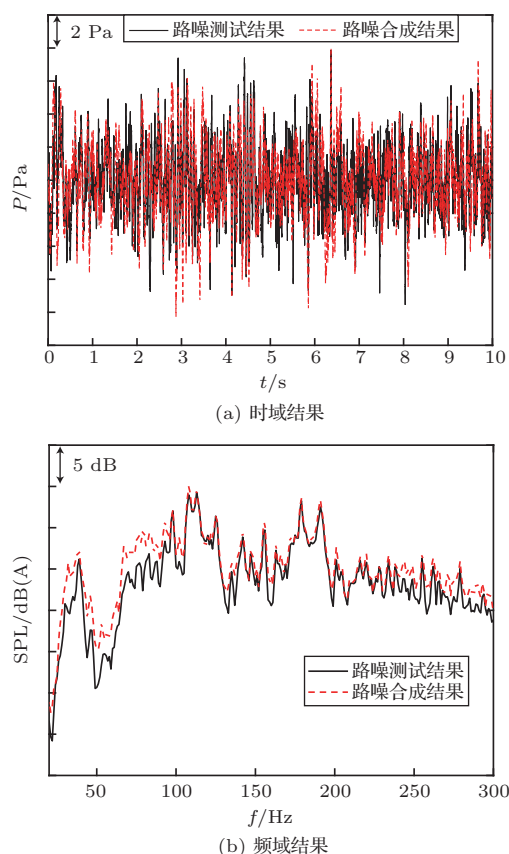


图3 某SUV车内路噪时域和频域曲线

Fig. 3 Interior time-domain and frequency-domain road noise SPL curve of an SUV

图4是低频压耳感问题的TPA分解,结合公式(1),以35 Hz声压级峰值频率为例,把组成该频率下车内噪声的所有路径进行贡献排序后,可以得到排名前3的悬架传递路径分别是后副车架右前Z向、左后Z向和右后Z向,即以后副车架为主的路径决定了低频压耳感声品质问题的产生。

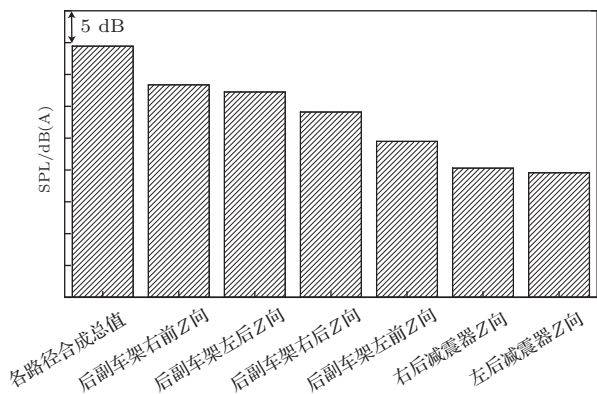


图4 低频路噪传递路径分解(35 Hz)

Fig. 4 Chassis transfer path decomposition of the low-frequency road noise (35 Hz)

3.3 基于CAE的问题优化

基于锁定的悬架传递路径,通过CAE的手段可以针对性地定位到问题产生的本质原因,理论上可以通过“源-路径-响应”三个方面进行优化。

“源”来自于路面和轮胎的相互作用。在30~40 Hz,轮胎存在整体的滚动模态,是引起低频压耳问题的激励源。在粗糙路面的随机载荷激励下,轮胎滚动模态被激发,从而在轮心处产生了明显的轮心力峰值。然而,轮胎的滚动模态往往是无法避免的,只能通过轮胎尺寸、运动或舒适风格的优化选型,在一定程度上降低滚动模态频率附近的轮胎力传递特性,但当车辆造型和风格确定后,在轮胎上可以调校的空间非常狭小,即“源”的大小无法进行有效的控制。

“路径”来自于悬架系统的传递。若在问题频率附近存在悬架整体模态,则会放大轮心力在悬架结构上的力传递;若悬架不存在整体模态,则也会被轮心力强迫激励,从而在悬架和车身的连接点上产生不同幅值的力,常称之为车身侧悬架依附点力。图5是引起低频压耳感问题的主要贡献路径的依附点力,发现在30~40 Hz频段内均存在力的峰值。

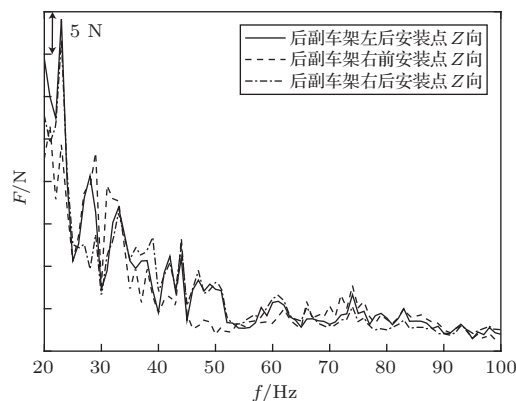


图5 主要贡献路径的依附点力

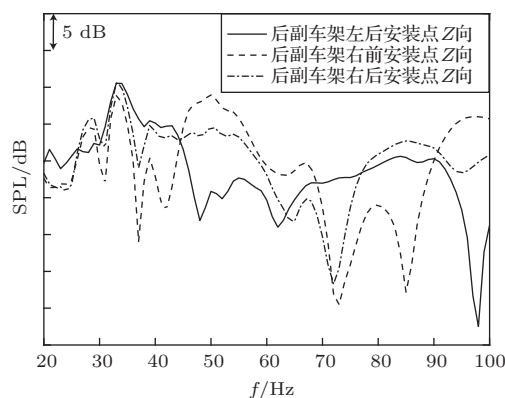
Fig. 5 Attachment forces of main contribution paths

“响应”来自于车身系统的噪声敏感度,即悬架系统在车身侧的安装点在单位力的扫频激励下,引起的车内声学响应,通常称之为噪声传递函数(Noise transfer function, NTF)。如果关键路径的NTF在问题频率附近存在明显的峰值,则会进一步放大悬架力激励车身引起的车内噪声。NTF存在峰值的原因一般有3种可能性:一是安装点在问题频率附近刚度不足,无法有效抑制悬架力的激励;二是车身存在整体模态,带动了车身的共振;三是车身某

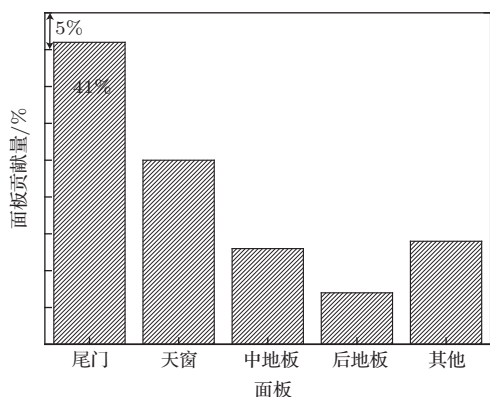
些大面板结构(如尾门、风挡玻璃、地板等)存在模态,该模态被激发后压迫车内声腔,从而形成车内噪声的贡献。

当新车型开发搭载较为成熟的平台架构后,一般无法对“源”和“路径”做大幅度的调整,因此本文重点通过“响应”进行低频压耳感问题的优化。

由图6(a)所示关键路径的NTF可以发现,在30~40 Hz内存在明显的峰值。因此可以基本确定,在关键路径的接附点力和NTF均存在明显峰值的情况下,引起了本文的路噪压耳感问题。采用面板贡献量分析对NTF峰值进行诊断,发现尾门的贡献为41%,占了主导贡献,如图6(b)所示。因为尾门在问题频率下存在前后方向整体的拍击模态,容易和车内声腔的1阶前后方向整体模态进行耦合,从而形成底盘路噪的主导贡献。



(a) 关键路径NTF



(b) 关键路径NTF面板贡献量分析

图6 内饰车身噪声敏感度问题分析

Fig. 6 Noise sensitivity analysis of a trimmed-body

本文研究的某SUV因采用贯穿式尾灯设计,因此尾门外板的中部设计了凹槽结构,致使尾门的整体刚度降低,整体模态频率下的振幅升高,从而形成了超过40%的噪声贡献。优化方案主要针对尾门外

板的弱点,在不改变贯穿式尾灯造型的需求下,通过增加尾门内外板之间的连接点提升整体刚度,降低尾门拍击模态下的振幅。优化后,30~40 Hz内的路噪峰值下降4 dB,如图7所示。

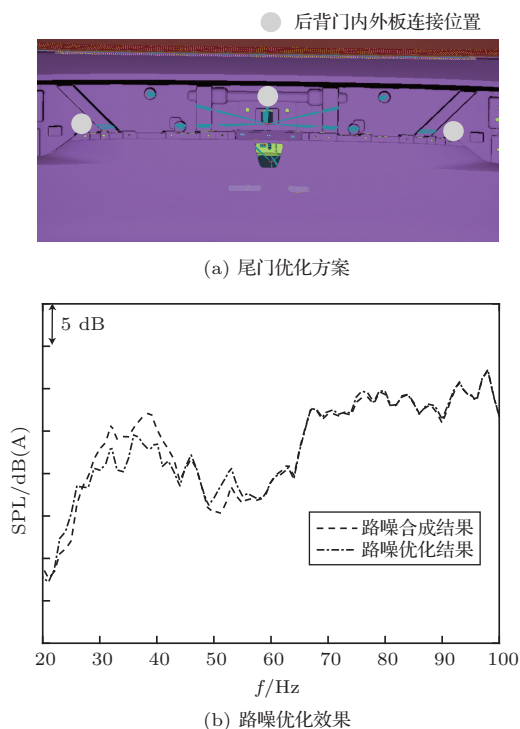


图7 路噪优化设计及结果

Fig. 7 Road noise optimal design and result

3.4 基于回放技术的主观评价

将CAE优化方案的效果替换到时域TPA回放模型中,组织10位专家进行优化前后的主观评价,主观评分从6.5分提升至7分,达到目标要求。

最后,基于主观评价后的CAE优化方案,进行试验验证,实车的客观测试和主观评价结果与上文的仿真结论基本一致,从而在项目开发过程中大幅降低了试错的成本,提高了开发效率。

4 结论

本文针对复杂的路噪声品质问题,采用时域TPA方法进行了问题的分解,并结合CAE方法开展了关键路径的分析和优化,可以为相关工程问题的解决提供技术参考。

(1) 基于TPA分解技术,量化各个贡献路径的分解,实现复杂问题的聚焦;

(2) 通过试验-仿真混合的方法,充分发挥CAE在解决实车工程问题中的能力,解释问题的本质并

提出针对性的有效方案,最终使30~40 Hz的路噪降低了约4 dB,有效改善了低频压耳感问题;

(3) 基于本文搭建的时域TPA回放模型,在后续平台化造车的项目中,可以实现平台化问题的快速聚焦、仿真结果的主观评价,大幅提高NVH开发效率。

参 考 文 献

- [1] Lee J U, Suh J K, Jeong S K. Development of input loads for road noise analysis[C]. SAE Technical Papers 2003-01-1608.
- [2] 黄剑锋, 许静超, 王常伟, 等. 基于多参考TPA与ODS的路噪诊断及优化[J]. 汽车科技, 2018(4): 72-77.
Huang Jianfeng, Xu Jingchao, Wang Changwei, et al. Road noise diagnosis and optimization based on multi-reference TPA and ODS[J]. Auto Sci-Tech, 2018(4): 72-77.
- [3] Baro S, Corradi R, Abom M, et al. Modelling of a lined tyre for predicting cavity noise mitigation[J]. Applied Acoustics, 2019, 155: 391-400.
- [4] Kim J G, Nam K U, Kang Y J. Evaluation of noise transfer path contributions using virtual springs with infinite stiffness[J]. Applied Acoustics, 2021, 178: 107991.
- [5] Cervantes-Madrid G, Peral-Orts R, Campillo-Davo N, et al. Inverse transfer path analysis, a different approach to shorten time in NVH assessments[J]. Applied Acoustics, 2021, 181: 108178.