

发动机振动噪声分析对车内 NVH 问题整改中的应用

王卓 许春铁

长安汽车股份有限公司汽车工程研究总院 CAE 工程所

摘要: 本文介绍了噪声传递函数 (NTF) 的原理, 并分析了以发动机悬置为输入点的动力总成振动传递路径。文章描述了以试验测量的发动机激励为输入, 驾驶员右耳处为输出点的声固耦合计算方法, 利用 HyperMesh 建立了有限元模型, 对车内噪声和振动曲线峰值进行优化。本文从汽车开发前期的动力总成悬置的解耦、发动机悬置支架的结构和车身结构三种方法来考虑和优化该峰值。

关键词: 振动, 噪声, NTF, 传递路径, HyperMesh, 优化

1 概述

随着汽车市场需求的逐步扩大, 国内汽车企业发展势头强劲, 人们对汽车的态度也早从以往的代步工具到现在的把汽车当成自己“身份”的象征, 噪声、振动与舒适性, 是衡量汽车制造质量的一个综合性问题, 它给汽车用户的感受是最直接和最表面的。业界把噪声、振动与舒适性的英文缩写为 NVH (Noise、Vibration、Harshness), 统称为车辆的 NVH 问题, 它是国际汽车业各大整车制造企业和零部件企业关注的问题之一。有统计资料显示, 整车约三分之一的故障问题是和车辆的 NVH 问题有关系, 而各大公司有近 20% 的研发费用消耗在解决车辆的 NVH 问题上。

相对于汽车而言, NVH 问题无处不在, 根据问题产生的来源又可分为发动机 NVH、车身 NVH、底盘 NVH 三大部分。NVH 问题是系统性的, 其中最主要的噪声源来自于发动机, 汽车的发动机和车身都通过弹性元件支撑在车桥和轮胎上, 构成一个弹性振动系统, 整个系统按照各总成部件又分为多个“弹性振动子系统”。当汽车在不同路面行驶时, 发动机、传动系自身的模态引起的抖动以及二次传动轴和车轮的不平衡受激励振动时, 各“子系统”发生振动而且会互相关联。

本文叙述的发动机振动噪声分析不是指发动机本身结构产生的振动噪声, 而是指由于发动机产生的激励传递到车身而引起的振动噪声的分析。在设计前期和设计中期、后期针对发动机激励对车身结构产生的振动噪声分为两种不同的方法, 在设计前期, 可以根据发动机本身的工作参数, 通过物理公式以及数学公式的推导, 得到相应的激励载荷, 在发动机质心进行加载; 在设计中期、后期可以根据选用的发动机在车身中测出不同频率下的激励载荷, 这时就可以在发动机悬置处进行加载。本文结合实际工程项目, 主要讲述车身设计开发的中、后期, 应用发动机振动噪声分析找到车身中结构设计不合理的部分, 对结构进行优化, 并利用

HyperWorks 前后处理软件和 Nastran 求解器对结果进行计算对比，快速找出问题原因，并与试验部门一起进行试验验证，提供整改方案，来达到对车内 NVH 问题整改的目的。

2 问题研究

本文主要讲述动力总成激励对车内噪声的影响，动力总成激励主要分为两大类，辐射噪声以及结构噪声，其中辐射噪声主要通过空气传递到车内，而结构噪声是由于动力总成振动传递到车身产生，结构传递的噪声可以采用 TPA (Transfer Path Analysis) 分析方法进行研究，因此由于发动机激励产生的振动噪声问题，应用 CAE 手段可以从噪声传递函数以及传递路径两方面来进行考虑。

2.1 噪声传递函数原理

在分析结构噪声的情况下，通常把激励源和响应点分为两个不同的系统，把激励源一侧的结构称为主动侧，响应点一侧的结构称为被动侧。对于驾驶员右耳处响应的结构声，被动方在耦合点处的每一个自由度到目标位置均形成一条传递路径。

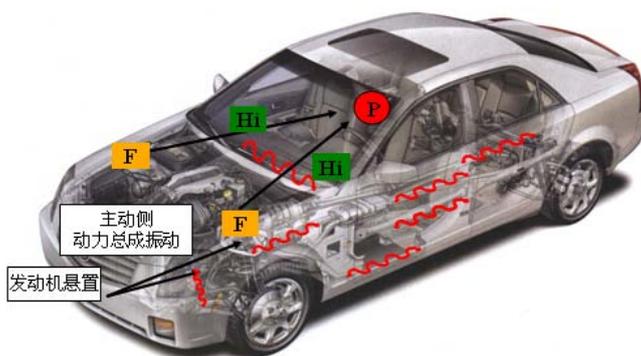


图 1 噪声传递函数示意图

在进行 CAE-NVH 分析时，假设整个系统是线性不变的，则车内的噪声声压或振动水平等于各激励源以工作载荷激励时沿着不同的路径传播到车内的能量叠加，因此可以用下面公式表示：

$$P = \sum_{i=1}^n H_i \cdot f_i \dots\dots\dots \text{公式 1}$$

其中：P表示指定位置的声压，本文中是指驾驶员右耳处声压；

H_i 表示从激励源到指定响应点声压的噪声传递函数；

f_i 表示施加在输入位置的激励力。

从上面公式可以看出，在整车内指定点的声压值，不仅和施加在输入位置的激励力有关系，还和激励源到指定点声压的噪声传递函数有很大关系。在车身开发的中、后期从技术水平和开发成本两个方面考虑，一般是不会更换发动机的，因此激励源的大小也就不能改变，那么在这种情况下，噪声传递函数值的大小，是我们在汽车开发过程中解决车身 NVH 问题需要重点考虑的问题之一，从结构上找出解决问题的方法。

2.2 传递路径分析基本原理

车内噪声和振动往往是由多个激励通过不同的传递路径抵达目标位置后叠加而成的。为了更好的优化整车的 NVH 性能，往往需要研究各个激励和传递路径的情况，针对其各自贡献量的大小有效地采取处理措施。传递路径分析（TPA）是一个很好的方法。通过传递路径分析可以找出对车内噪声起主导作用的路径，通过控制和改进这些路径以使车内噪声控制在预定的目标值内。

下图为实际工程项目中发动机纵置布置示意图，从图中可以看出，动力总成通过发动机悬置和悬置安装横梁直接将振动传到车身，通过排气管与车身连接的挂钩也可以将振动传递到车身产生结构声，使车身薄壁件与车内声腔耦合振动从而产生噪声。

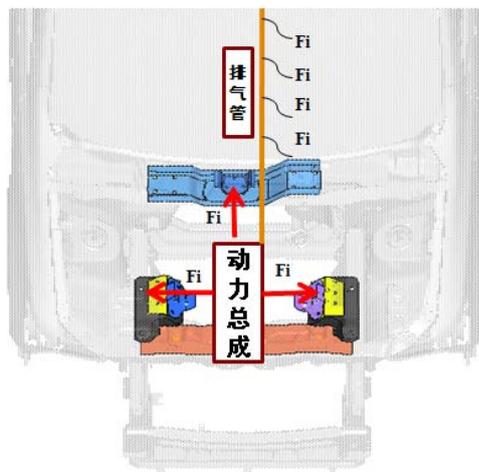


图 2 传递路径示意图

在发动机悬置支架被动侧加载，通过发动机悬置达到车身的传递路径，可以由以下公式推导得出：

由系统的运动学方程可以得出

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H'_{11} & H'_{12} & \dots & H'_{1n} \\ H'_{21} & H'_{22} & \dots & H'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H'_{m1} & H'_{m2} & \dots & H'_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} \dots\dots\dots \text{公式 2}$$

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}'' & H_{12}'' & \dots & H_{1n}'' \\ H_{21}'' & H_{22}'' & \dots & H_{2n}'' \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{q1}'' & H_{q2}'' & \dots & H_{qn}'' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} \dots\dots\dots \text{公式 3}$$

由公式 2 求逆矩阵带入公式 3 可得到:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}'' & H_{12}'' & \dots & H_{1n}'' \\ H_{21}'' & H_{22}'' & \dots & H_{2n}'' \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{q1}'' & H_{q2}'' & \dots & H_{qn}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{m1} & H_{m2} & \dots & H_{mn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{Bmatrix} \dots\dots\dots \text{公式 4}$$

- 其中: F_i 动力总成激励引起的车身激励力;
- a_i 动力总成激励的加速度, 可以直接使用发动机激励载荷;
- H' 动力总成激励通过某条路径引起该传递路径车身接附点对车身激励的传递函数;
- H'' 表示某条路径车身接附点激励到车内噪声的传递函数;
- P 车内目标点声压。

3 分析应用

通过噪声传递函数和传递路径的分析, 可以在汽车设计开发前期有效的控制噪声峰值出现的问题, 在项目开展后期也可以通过试验对标找到问题, 对该问题进行整改。

以下介绍在实际项目中应用发动机振动噪声分析在项目开展中期对车内噪声问题的整改, 下图为 0—200Hz, 以实际发动机输出为激励, 驾驶员右耳为响应点的噪声曲线。在试车道进行主观评价发现在 3000rpm 附近出现轰鸣声, 该车发动机为四缸汽油机, 对应该转速的发动机二阶频率为 100Hz 左右, 通过 CAE 分析, 发现在 100Hz 附近发动机悬置出现一模式, 而该阶模式是由于连接在悬置上的横梁模式引起, 因此初步判断该峰值的出现为发动机悬置及悬置横梁偏弱造成。此外, 通过对车身模式、以及闭合件模式的计算分析发现模式结果有没有达到要求, 对比同类型车结果偏小, 对车身和闭合件进行结构优化, 使固有频率提高也可能对结果有所提高。

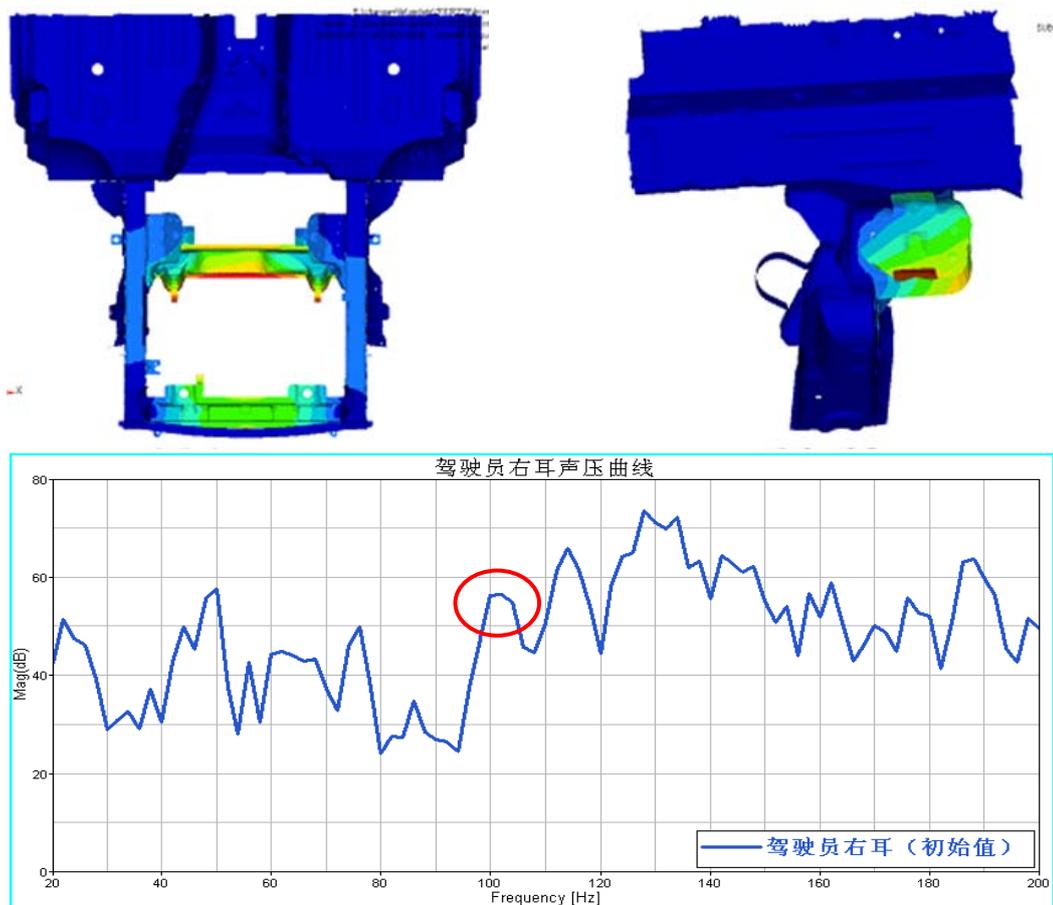


图 3 驾驶员右耳处声压曲线

4 分析模型

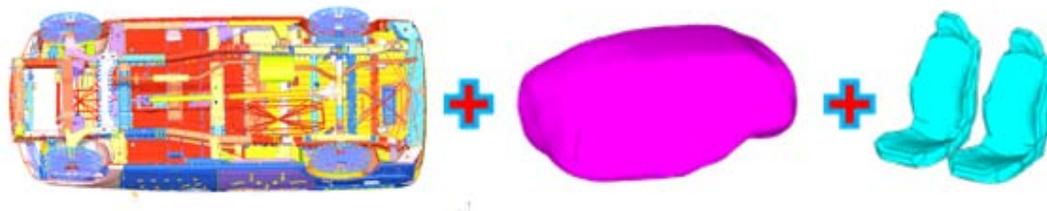


图 4 有限元模型示意图

分析模型为整车模型、声腔模型，整车模型为内饰车身模型+动力总成+底盘系统+排气系统，焊点采用 ACM 焊点，粘胶用 SOLID 单元模拟，动力总成在质心位置施加集中质量和转动惯量。质心位置、集中质量、转动惯量均为试验部门提供。所有的衬套单元均用 BUSH 单元模拟建立，各个方向的刚度值也都是试验部门提供；声腔模型采用四面体 SOLID 单元模型，材料采用 MAT10 定义，应用该分析的有限元模型如图 4 所示。扫频频率范围为 20—200Hz。

5 结果对比

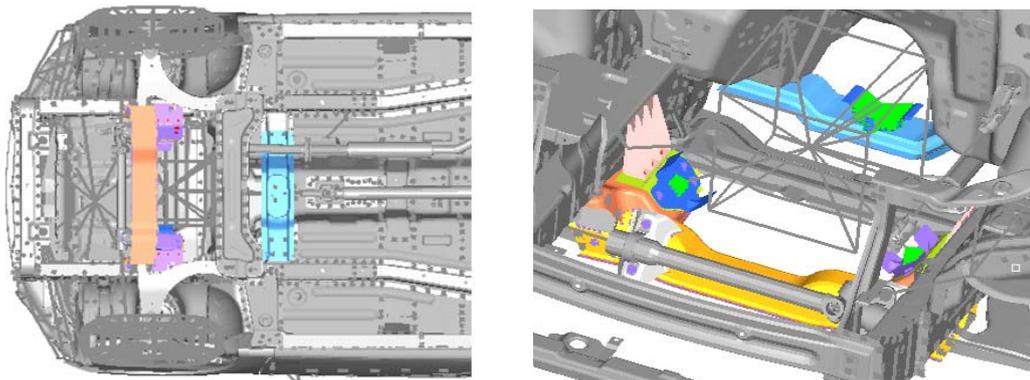


图 5 方案设计位置示意图

图 5 中显示方案设计中结构加强的位置，由于前面初步判断 100Hz 峰值可能是由于悬置支架以及连接悬置支架横梁偏弱造成，因此增强发动机悬置与纵梁的连接，增加悬置支架和横梁的固有模态以及车身整体模态和加强闭合件是主要的方案设计方向，略去中间过程，总结为两个方案：

方案一：增加发动机悬置和连接横梁的固有频率；

方案二：在方案一基础上增加白车身整体模态和车身闭合件的固有频率。

下图为两个方案的结果对比：

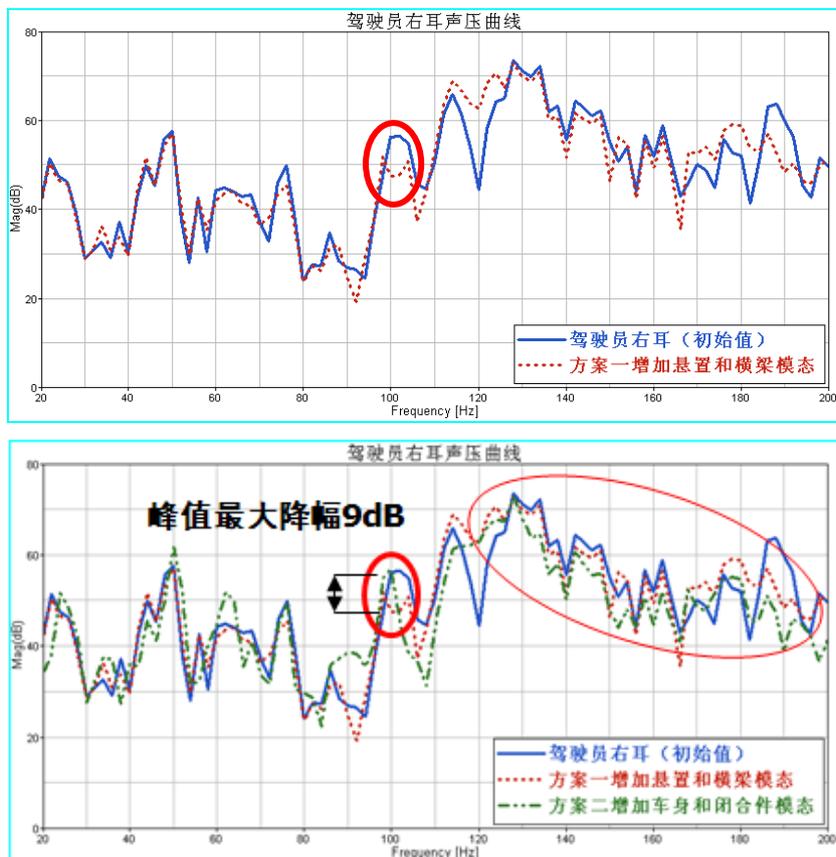


图 6 方案结果对比图

通过对上述的方案验证并从图 6 中可以看到,加强发动机悬置和连接悬置横梁的结构来提高它们的固有频率,对 100Hz 附近的峰值有很好的相关性。方案一和原始结果相比,在 100Hz 附近降幅最大为 9dB 左右,而且在 100Hz 以后曲线整体下降,达到了理想的效果;方案二在方案一的基础上,优化了白车身的整体模态和闭合件的固有频率,从图 6 中可以看到,在 100Hz 以后曲线整体急剧下降,整体下降幅度都在方案一的基础上,因此方案二对结果优化起到了积极作用。

6 结论

通过 CAE 手段,进行发动机振动噪声分析从真实激励中得到响应曲线,对车身结构进行优化,提出优化建议,并结合试验验证方案的有效性和可行性,快速提升整车 NVH 性能。

本文通过对原始声压曲线以及模态振形图中分析,找到问题所在,对结果进行优化。在项目开展初期,设计部门进行动力总成悬置系统设计,这个时候要从解耦度来进行考虑,要尽量使解耦度达到最大,这也是提高整车 NVH 性能很重要的一个方面。

当遇到车内噪声大时,人们一般考虑加强车内隔音技术和材料,而对真正的噪声发生源-发动机则是无能为力,这只是“亡羊补牢”,无法从根本上解决问题。如果运用 CAE-NVH 解决方案,就会涉及发动机、悬置以及车架等,从根本上减少噪声产生的来源。因此,NVH 问题实质是汽车设计中要解决的问题,而不是汽车进入市场后要解决的问题。

7 参考文献

- [1] 庞剑 谌刚 何华编 《汽车噪声与振动理论与应用》 北京理工大学出版社 2006
- [2] 李楚琳 张胜兰 冯樱 杨朝阳编 《HyperWorks 分析应用实例》 机械工业出版社 2008
- [3] 张胜兰 李楚琳 郑冬黎 郝琪编 《基于 HyperWorks 的结构优化设计技术》 机械工业出版社 2008
- [4] Gregor Koners. Panel Noise Contribution Analysis: An Experimental Method for Determining the Noise Contributions of Panels to an Interior Noise. 2003, paper 2003-01-1410.
- [5] Krishna R. Dubbaka. Application of Noise Path Target Setting Using the Technique of Transfer Path Analysis.2003, paper 2003-01-1402.

Application of Engine Vibration and Noise Analysis in Improvement of Whole Vehicle NVH Problem

Abstract: The paper introduces NTF(Noise Transfer Function)theory,and analyzes the transfer paths of powerplant vibration by the input-load points of engine mounts. This article developed from a car early decoupling engine mounting, engine mounting brackets structure, and body structure are three ways to consider and optimize the peak.

Key words: vibration, Trimmed Body, NTF, Topography Optimization, Mode, HyperMesh