



## 马恒达摩托车 轰鸣声背后的仿真分析

借助多物理场仿真, 印度马恒达摩托车公司对高端豪华摩托车的发动机进行了改进, 在符合噪声限值的同时, 最大限度地维持了客户满意度。

作者 **VALERIO MARRA**

近年来, 马恒达摩托车公司 (Mahindra Two Wheelers) 在印度市场推出了多种款式的摩托车和轻便摩托车。他们在产品开发初期便引入了数值仿真工具, 对摩托车发动机、进气和排气系统的噪声、振动与声振粗糙度 (noise, vibration, harshness, 简称 NVH) 性能进行了研究和优化, 这使得驾驶员和乘客即使行驶在印度颠簸的道路上, 也可以享受卓越的车辆性能带来的舒适驾驶体验。

马恒达的工程师使用数值仿真获取了所需的数据和知识, 并基于分析结果对摩托车发动机的结构设计进行改良, 使噪声降至期望水平。公司的研发副经理 Niket Bhatia 表示: “COMSOL 软件帮助我们大幅减少了设计迭代次数, 为我们节省了宝贵的时间。”

### ⇒ 使噪声达到最优水平

发动机中存在许多噪声源, 进气和燃烧过程、活塞、齿轮、配气机构和排气系统均可能发出噪声。燃烧噪声是由气缸内急剧上升的压力引起的结构振动造成的。这些振动通过

轴承从传动系统传送到发动机外壳, 进而向周围环境中辐射噪声。

若只依靠物理测试进行声学分析, 不仅实验费用过高, 耗时也会过长。考虑到这一点, 马恒达的研发团队决定采用声学仿真作为物理测试的必要补充, 希望能够更为全面地对发动机结构的噪声辐射来源进行分析。研究的目的是找到发动机中最大的噪声源, 并提出结构改进方案, 从而有效降低了噪声。

马恒达的研究人员利用 COMSOL Multiphysics® 软件, 对燃烧负荷作用下的单缸内燃发动机执行了声辐射分析。工程师将整个发动机包裹在计算域中, 并在计算域外部添加了完美匹配层 (perfectly matched layer, 简称 PML)。

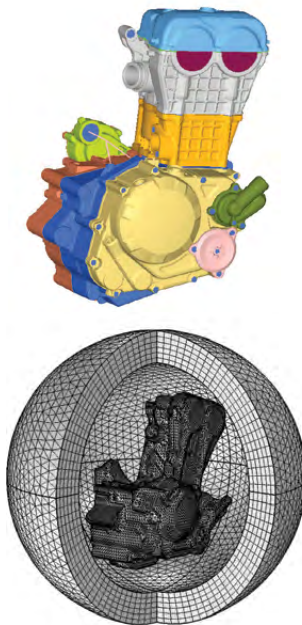


图 1. 上图: 发动机的 CAD 几何模型。下图: 网格剖分后的三维模型被完美匹配层 (PML) 包围了起来。

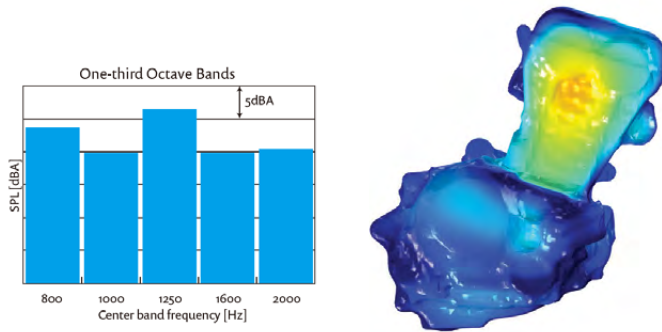


图 2. 左图: 三分之一的倍频图; 右图: 声压级 (SPL) 仿真结果的三维表面图。

PML 的作用是通过衰减向外辐射的声波, 使得在计算域边界处的反射极小或完全没有反射 (图 1)。这种做法能够在保证结果准确的前提下, 有效地减少计算域的大小。

研究团队决定将分析的频率范围限定在 800~2000 Hz 之间。这一限定是因为实验表明, 在上述声音频率范围, 燃烧负荷下的发动机噪声辐射是摩托车噪声的主要来源。选定一段频率范围有利于研究团队节省计算资源, 更加明确地找出哪些区域会向外辐射最多的噪声。

基于上述分析, 团队人员对声压级 (sound pressure level, 简称 SPL) 展开了深入研究, 并调整了缸体和缸盖的相关参数 (图 2), 例如增加肋高和壁厚以及加固安装位置。通过调整这些参数, 研究人员成功降低了目标频率范围内的声压级。

### ⇒ 进气结构降噪处理

进气噪声和排气噪声是产生通过噪声 (pass-by noise, 即车辆整体通过时引起的噪声) 的主要因素。而进气噪声主要源于空气过滤器 (通常由塑料制成) 结构辐射的噪声。对此, 研究人员分析了由塑料制成的空气过滤器壁上的声学传递函数 (acoustic transfer function, 简称 ATF)。为了改进 ATF, 他们添加了肋片以加强空气过滤器的结构强度 (图 3), 这有助于降低其结构噪声 (图 4)。

### ⇒ 分析传输损耗以提升消声器的效果

有趣的一点是, 相关法规对摩托车的噪声水平提出了限制, 然而消费者却希望摩托车能发出更响亮的轰鸣声, 因为他们认为这种轰鸣声是发动机拥有强劲动力的标志。法规与消费者需求的冲突给马恒达的工程师带来了挑战。工程师们需要在保持通过噪声符合规定的前提下, 加大从消声器中发出的低频轰鸣声, 同时降低较高频率下的声压级。

除了需要分析消声器对发动机排气噪声的消减外, 与消声

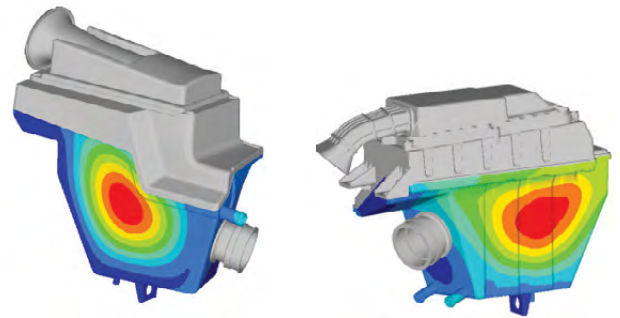


图 3. 空气过滤器结构图。左图: 初始设计; 右图: 改进后的设计。模型中添加了肋片用于改进 ATF。

器相关的许多其他因素也需要考虑, 例如提供低回压的能力, 以及如何满足通过噪声的相关规定。汽车排气系统中消声器的性能可量化为以下三个参数: 传输损耗、插入损耗和辐射噪声水平。其中, 传输损耗被认为是最重要的参数, 它只与消声器的设计有关, 而与压力源无关。马恒达研发团队的任务正是通过预测摩托车消声器的传输损耗, 从而将一定频率范围内的损耗优化至期望水平。

为此, 研究人员选择单缸摩托车发动机的消声器作为分析对象, 并使用了

COMSOL Multiphysics 对消声器的传输损耗进行了分析。通过软件中的“声学模块”, 他们在适当的位置施加了连续性和硬声场壁等边界条件。

借助软件内置的转移阻抗模型, 研究团队利用孔隙率等参数对管道中的穿孔区域进行了定义。需要输入的参数包括面积孔隙率、挡板和管道厚度以及孔径。至于玻璃棉等多孔材料, 可使用软件中的多孔声学模型对流阻率进行定义。研究人员在模型的入口处施加单位压力作为输入, 同时将平面波辐射条件应用于入口和出口。

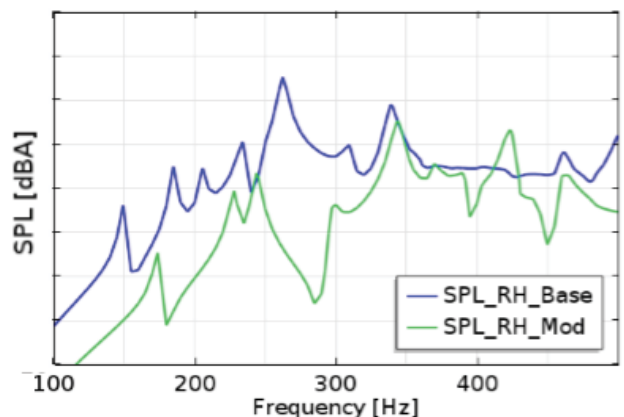


图 4. 仿真结果显示, 改进后的空气过滤器设计有效地降低了结构噪声。

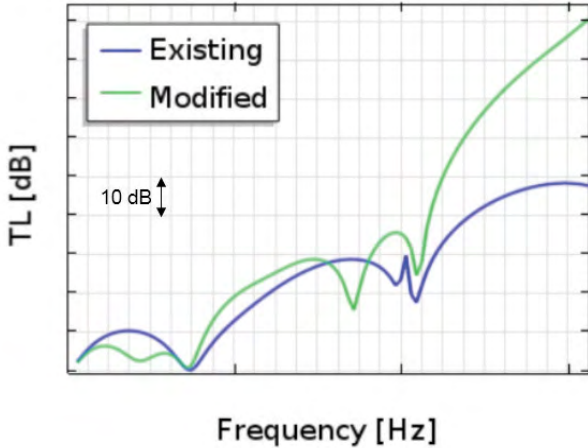


图 5. 不同设计的传输损耗 (transmission loss, 简称 TL) 对比图。设计的改进主要体现在:降低在低频的传输损耗,并提高在高频的传输损耗。修改后的设计不仅符合了规定,还保留了客户喜爱的“轰鸣声”。

**“我们使用 ‘App 开发者’ 创建了一个仿真 App, 从而可以非常方便地对比仿真分析的输出文件, 并绘制声压级数据, 而为我们节省了大量宝贵的时间。”**

— ULHAS MOHITE, 马恒达公司研发经理

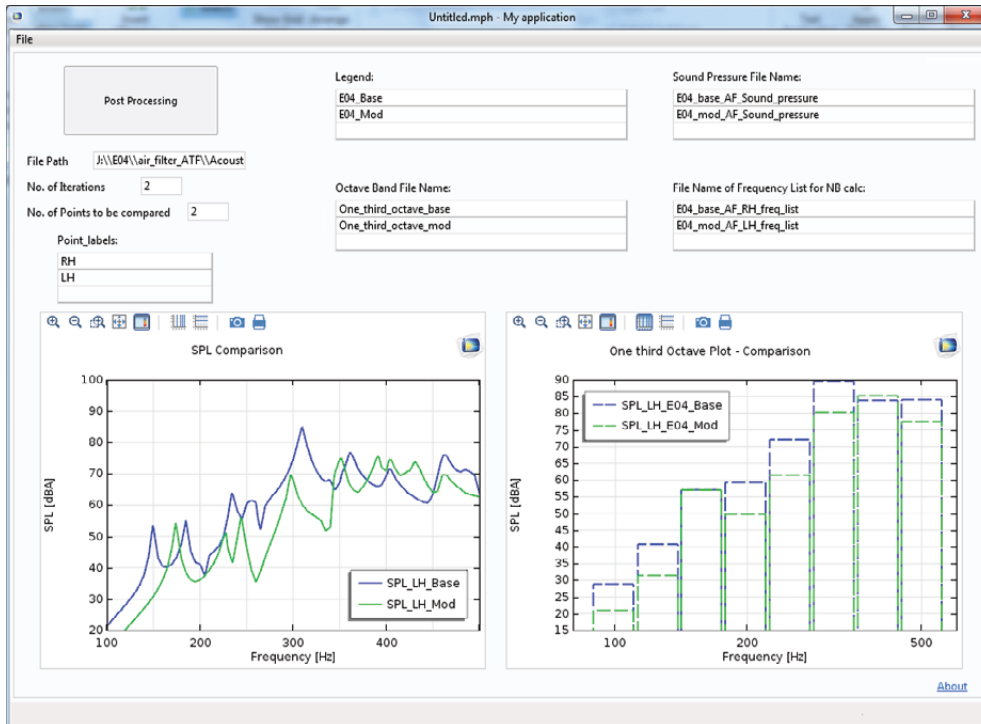


图 6. 借助“App 开发者”, 马恒达的工程师开发了一个操作简便的仿真 App, 可用于对比分析文件以及绘制声压级 (SPL) 数据。

基于分析结果, 设计人员加长了消声器内部的管道长度。改进后的消声器大幅降低了低频下的传输损耗 (图 5), 因此能够增加低频下的噪声水平, 也就是保留了用户喜爱的轰鸣声。

⇒ 在设计初期引入优化流程, 节省成本和时间

“我个人非常欣赏 COMSOL 软件的灵活性以及像 COMSOL API 这样的内置工具。”马恒达公司研发经理 Ulhas Mohite 评论道, “在软件中, 我们可以通过使用 Java 代码自动执行仿真任务, 例如在处理声学分析时, 我们能够针对不同的频率步长采用不同的网格, 从而在仿真精度和计算时间之间找到最佳的平衡点。除此之外, 软件还能在仿真运行时自动输出例如表面声压级绘图和远场声压级数据等信息。由于无需再对数据进行手动后处理和数据导出, 这帮助我们节省了大量的时间。”

此外, Mohite 还认为 COMSOL 软件内置的“App 开发者”具有非常实用的价值。他补充道: “我们使用 ‘App 开发者’ 创建了一个仿真 App (图 6), 可以让我们可以非常方便地对比仿真分析

的输出文件, 并绘制声压级数据, 这为我们节省了大量宝贵的时间。”

对比结果表明, 仿真分析的结果与物理实验数据高度匹配。通过仿真分析, 马恒达的工程师能够在设计阶段的初期基于分析结果调整结构设计, 并采取正确的纠正措施, 从而减少了产品开发所需的时间和成本。Bhatia 总结道: “通过实验的验证, 仿真分析为我们提供了清晰的产品优化思路, 帮助我们有效地解决了摩托车的噪声问题。” ❖

参考文献

1. Mohite, U., Bhatia, N., and Bhavsar, P., "An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load," SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244. (<http://papers.sae.org/2015-01-2244/>)
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, COMSOL Blog, <https://www.comsol.com/blogs/reducing-motorcycle-engine-noise-with-acoustics-modeling/>