某汽油机进气系统声学性能仿真研究及优化

The Acoustic Performance Simulation and Optimization Of a gasoline engine intake system

刘岳兵 王伟民 蔡志强 许文志

（东风汽车公司技术中心）

Liu Yuebing, Wang Weimin, Cai Zhiqiang, Xu Wenzhi

(Dongfeng motoring technical center, Wuhan, 430056)

摘　要: 本文以某 1.6L 汽油机进气系统声学性能改善为例，介绍了联合利用 GEM3D 和 GT-Power 软件进行进气系统声学性能计算的过程和方法。结果显示，该方法可以有效地对各种降噪结构的降噪效果进行预测，同时分析进气系统的改变对发动机性能的影响，具有较好的精度。利用该组合方法可以为进气系统的开发提供快速有效的指导。

关键词: 进气系统; GEM3D; GT-Power; 声学性能

Abstract: Using the acoustic performance improvement of a 1.6L gasoline engine intake system as an example. The calculation process and method for acoustic performance simulation which used GEM3D and GT-Power has been introduced. The results show, this method can predict acoustic performance for different kinds of structure effectively. It can also analysis the influence on engine performance as well when intake system has been changed. So that, the method can provides a fast and effective guidance for intake system design.

Keywords: Intake system, GEM3D, GT-Power, Acoustic performance

1 前言

发动机进气系统噪声属于周期性噪声，是由于气体扰动以及气体与其它物体间的相互作用而产生的，在发动机总噪声中占有重要分量，是汽车最主要的噪声源之一[1-5]。进气噪声沿进气系统向外传播，一部分从进气口向外辐射成为管口辐射噪声，另一部分引起管道振动成为壁面辐射噪声。进气管口的噪声是影响整车通过噪声的一项重要因素，随着人们对舒适性的要求越来越高，噪声法规日益严格，限值越来越低，因此，对进气系统进行降噪设计是十分有必要的。通常，为了降低由振动引起的壁面辐射噪声，需要采用提高管道刚度的措施，

而为了降低管口辐射噪声，在保证发动机功率的情况下，除常规的空滤器外，往往还需要添加额外的消音元件。

本文应用 GT-SUITE 软件的辅助建模工具 GEM3D 对进气系统三维数模进行离散处理后，联合热力学分析软件 GT-Power 中建立的发动机模型进行声学分析，计算出发动机进气口噪声的声压级。在整车空间布置允许的情况下，通过调整消声元件的类型、结构参数及数量来逐步降低进气口的噪声，直到满足控制要求。

2 进气系统进气口降噪设计步骤

1） 明确发动机噪声频谱，以及进气系统的设计空间边界。首先用一根管子与发动机相连，类似于测量排气系统的空管噪音，测量进气口的噪声频谱，并与目标值进行比较，从而得到所需的传递损失曲线。

2） 设计空滤器。空滤器除了能够过滤空气外还是一个扩张消声器。在空间布置允许的情况下，空滤器的容积应该尽可能大，这样传递损失大而且覆盖的频带宽。

空滤器的传递损失为：

$$TL = 10\lg[1 + 0.25(m - \frac{1}{m})^2 (\frac{\sin(\frac{2\pi L}{\lambda})}{\cos(\frac{2\pi L_a}{\lambda})\cos(\frac{2\pi L_b}{\lambda})})^2] \quad (1)$$

式（1）中，L 为空滤器本体的长度； L_a 为进入管在空滤器中的长度；

L_b 为出口管在空滤器中的长度； m 为扩张比。

当 L_a 和 L_b 都为零的时候，公式就变成了扩张消声器的传递损失公式。另外，从降噪的效果来看，扩张比 m 的值越大越好。通常，增大扩张比的途径有以下两种，一为减小管道的尺寸，二是增加空滤器的截面积。但是，减小管道的尺寸会使得发动机的功率损失增大，而增加空滤器的截面积又受到发动机舱空间布置的限制，因此，m 值的选取，需要综合考虑以上两方面的因素。

3） 根据加了空滤后的进气口噪声确定所需的消声器元件。郝姆霍兹消声器主要针对低频噪声，1/4 波长管主要用来消除高频噪声。

郝姆霍兹消声器的共振频率为：

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S_c}{Vl_c}} \quad (2)$$

式中：c 为声音在空气中的传播速度；V 为消声腔的容积；

l_c 为连接管长度； S_c 为连接管截面积。

1/4 波长管的共振频率为：

$$f = \frac{(2n-1)c}{4(L-\frac{8r}{3\pi})} \qquad (3)$$

式中：c 为声音在空气中的传播速度；L 为管长；r 为波长管半径；n 为共振阶次。

3 进气系统模型处理及离散

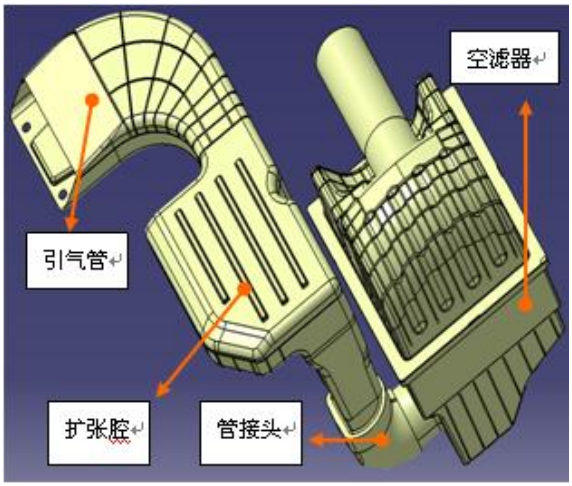

图 1　某 1.6L 发动机进气系统节气门前端模型图

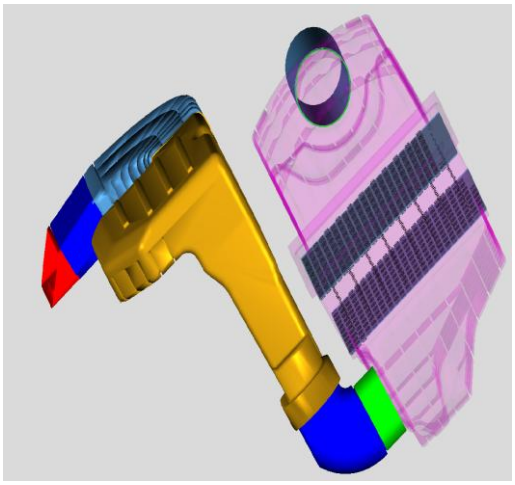

图 2　GEM3D 中转换后的模型图

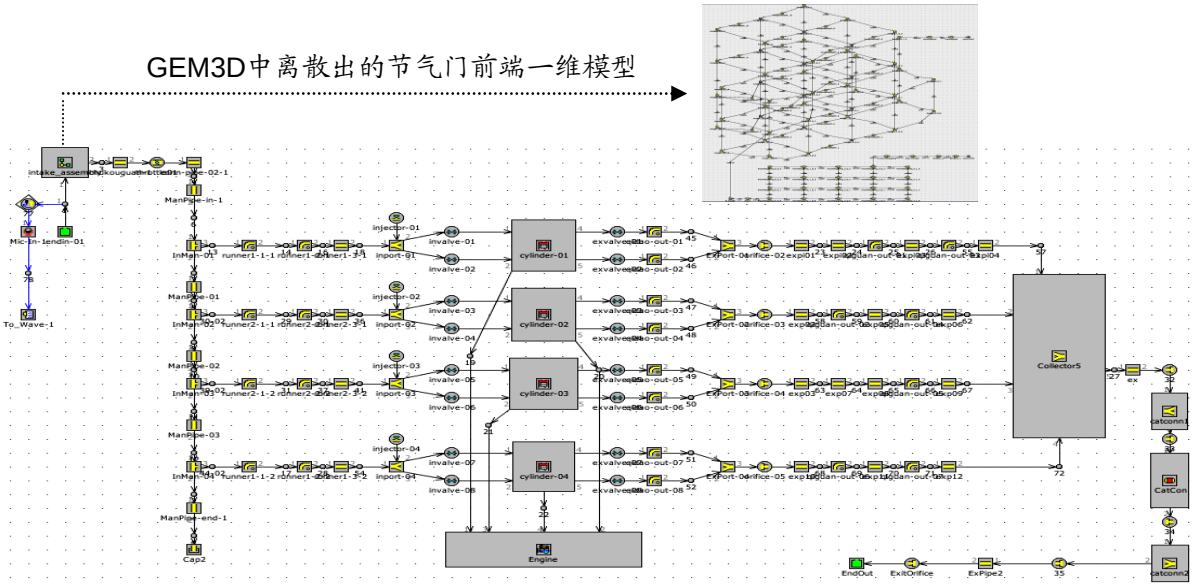

图 3　某 1.6L 发动机一维热力学性能仿真分析模型图

模型处理的主要事项如下：

1）将三维数模中抽取的壳体保存为.stl 的格式，并通过 GEM3D 的 surface 模式进行导入。

2）引气管按照相关管路进行转化，由于扩张腔和空滤腔形状比较复杂，为了更好地保留两个腔体各自的结构特征，在模型转化的时候，需要利用 mesh shell 的方式来进行转化，在这之前需要将这两个腔体的进出口以及其它孔洞密封，这样转化后模型的形状就和转化前

的一模一样，然后再将相应的进出口管路单独重新建好后再与转化后的模型相交构成通路。

3）空滤腔中滤芯的模拟，先要用两个隔板隔出滤芯的空间，然后对隔板打 99%的孔，再在其中加吸声材料，吸声材料的装载密度需要根据进气系统的压损要求来确定。

4 发动机进气系统噪声计算分析

将上述方案的模型在 GEM3D 中离散后，在 GT-Power 软件中结合已经标定的发动机模型（如图 3 所示）来计算进气系统管口的噪声情况。下图 4 为上述方案模型计算得到的各阶次噪声情况，从对总噪声的贡献方面来看，二阶噪声占有主导地位。项目组针对整车 NVH 试验情况的反馈，希望将该进气系统在 2800rpm 附近的总噪声降低 4~5dB。由于发动机舱内能利用的空间有限，采用单一的消声措施达到降噪 4~5dB 可能有一定困难，为了达到上述目的，考虑采用两种消声措施组合进行。结合实际情况，初步提出了七种改善方案，通过仿真分析选出了其中三种能够达到预期要求的改善方案予以说明，并进行试验。

改进方案 1：先在管接头侧面打孔，计划在全转速范围内将总噪声降低 2~3dB，然后在管接头下部针对 2800rpm 的 2 阶噪声加装 93.3HZ 的谐振腔（由 2*2800/60=93.3HZ 所得），预计将此处的总噪声再降低 2~3dB，以此来达到改善目标。

改进方案 2：先在管接头侧面打孔，计划在全转速范围内将总噪声降低 2~3dB，然后在空滤器的出口处针对 2800rpm 的 2 阶噪声加装 93.3HZ 的谐振腔，预计将此处的总噪声再降低 2~3dB，以此来达到改善目标。

改进方案 3：在发动机动力性能允许适当调整的范围内，将扩张腔和空滤器进口处的截面积适当减小（约 90%等效直径），然后在管接头的侧面跟前两个方案类似打孔。

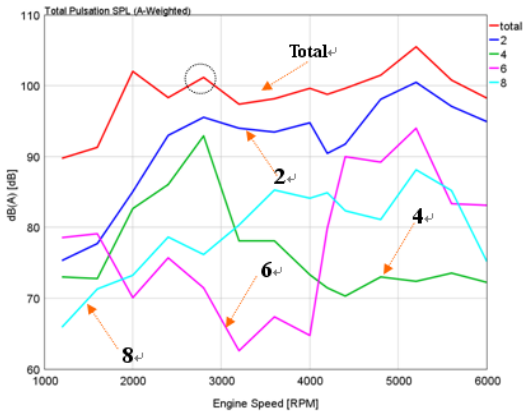

图 4　原方案噪声计算结果

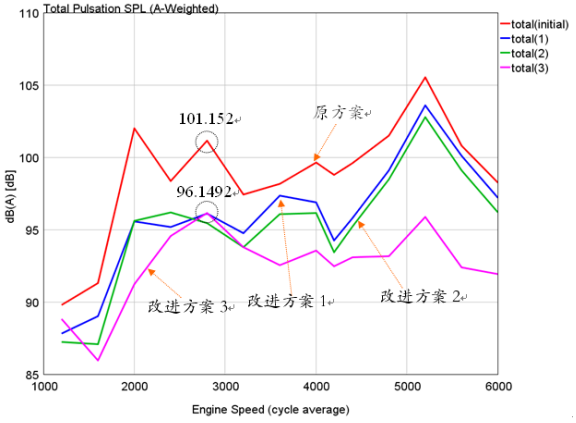

图 5　改进前后各方案总噪声计算结果图

分析计算结果(图 5)可知，三种改进方案均能满足整车 NVH 要求进气系统在 2800rpm 附件总噪声下降 4~5dB 的期望，相比而言，方案 3 更能在全转速范围内有效地降低总噪声，而功率损失控制在 2%左右，满足设计要求。

5 方案试验验证

试验过程中，根据整车 NVH 实际改善效果的情况，对进气系统三种推荐改善方案中谐振

腔连接管的长度进行了修正，将主降噪位置调到了 2400rpm 附近，从图 6 可以看出，三种方案的进气口噪声改善效果跟仿真预测的趋势相一致。图 7 中显示，在 2400rpm 附近，方案 3 对应的车内后排噪声也有明显改善，达到了方案改善的预期要求。

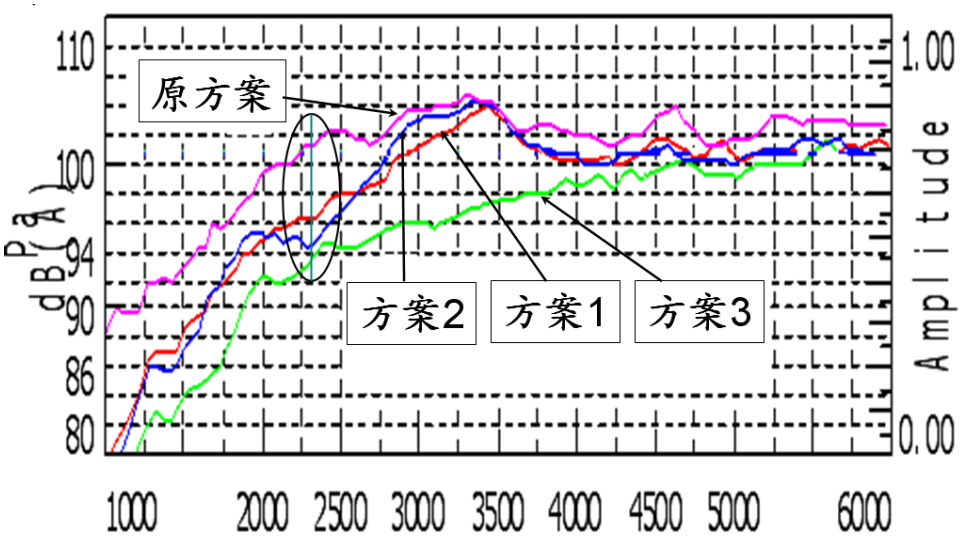

图 6　改进前后各方案入口总噪声实测结果（整车试验）

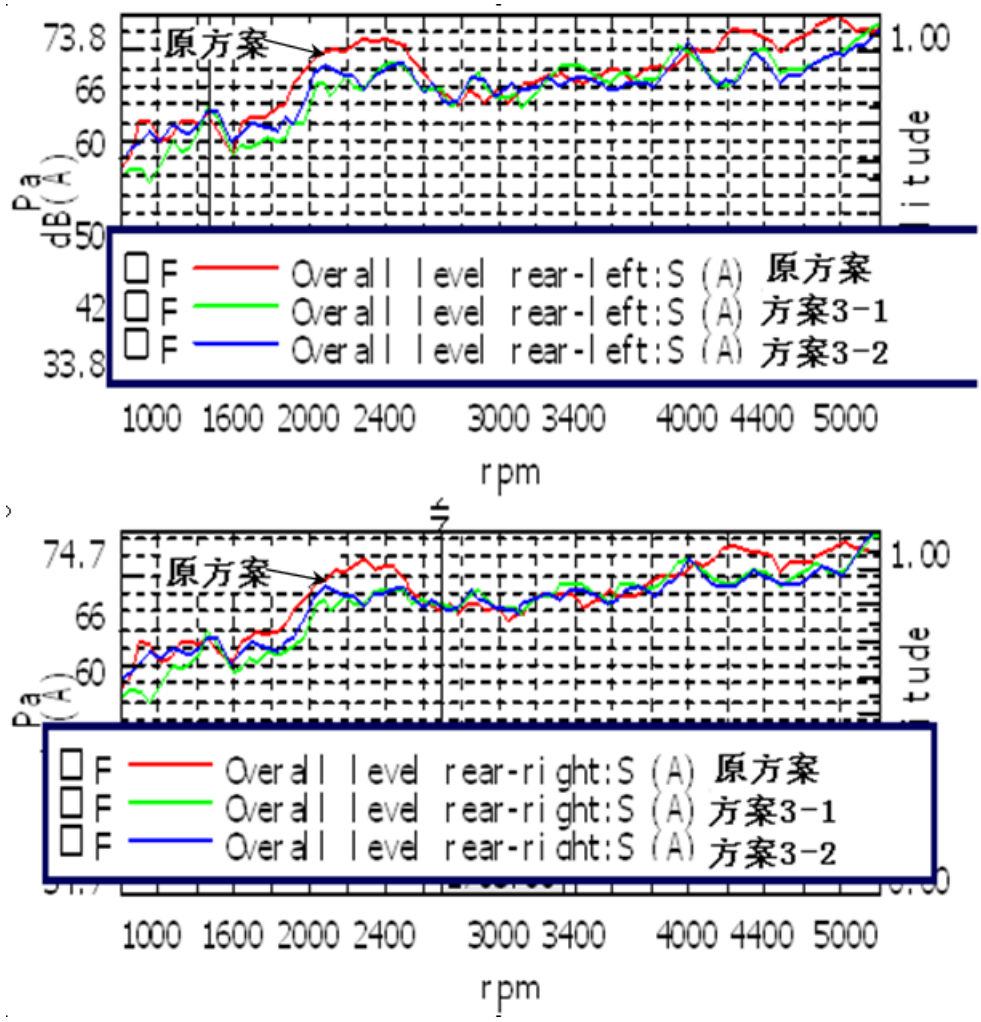

图 7　原方案和方案 3 车后排总噪声实测结果对比图

6 结论

1）以上三种改进方案均能满足整车 NVH 要求进气系统在指定转速附近入口处总噪声下降 4~5dB 的期望，相比而言，方案 3 更能在全转速范围内有效地降低入口总噪声和指定范围内的车内后排噪声，而功率损失控制在 2%左右，满足设计要求。

2）GT-Power 软件能够预测发动机进气口的噪声，结合辅助建模工具 GEM3D 能够对各种降噪结构的降噪效果进行预测，同时能够兼顾分析进气系统改变对发动机性能的影响，从而为进气系统的开发提供快速有效的指导。

3）相比郝姆霍兹消声器能够针对特定的频率进行有效消声，在驻波反节点处添加合适数量的小孔则能够在更大转速范围内有效降低总噪声。

4）由于没有考虑气流再生噪声的影响，利用该方法虽然暂不能得到十分准确的噪声结果数值，发动机转速越高，误差也将会越大；但该方法对不同进气系统方案本身声学性能的优劣而言，能进行很好的预判，同时能够从系统的角度考虑其对发动机性能的影响，具有较

高的应用价值。

参考文献

[1] 庞剑，谌刚，何华等.汽车噪声与振动[M].北京理工大学出版社，2003.

[2] 岳贵平，张义民.小型汽油机进气系统声学性能优化设计[J].工程设计学报，2010(4):273-277.

[3] 岳贵平，张义民.基于管口噪声灵敏度分析的进气系统结构改进，2010，46(23): 77-81

[4] 朱廉洁,季振林.汽车发动机空气滤清器消声特性研究[J].汽车工程,2008(3):260-263.

[5] Stephen Massey & Pual S. Modelly Exhaust Systems Using One-Dimensional Methods [J].SAE 2002-01-0005