

基于GT-Power和modeFRONTIER的汽车排气声学优化

张鹏飞, 刘健, 周帅利, 马卓, 严才宝, 魏涛, 张佳博
(上海天纳克排气系统有限公司, 上海)

摘要: 针对某车型排气系统尾管噪声小幅度超客户目标的问题, 结合 GT-Power 仿真和实验数据, 对仿真模型进行修正。然后再次求解, 仿真和测试具有较高的一致性。接着通过 GT-Power 和 modeFRONTIER 软件对排气消声器内部结构进行优化, 从而降低排气尾管噪声。结果表明修正模型可以很好的提高仿真计算精度。同时通过合理的优化设置, 在特定转速 2000-4000rpm, 关注的阶次噪声得到了很大改善, 满足客户要求。

关键词: 排气噪声; GT-Power; modeFRONTIER; 噪声优化

Abstract: The GT-POWER simulation software and LMS.Test test software are used to analyze the tail pipe order noise and airflow noise. Then simulation and test results are analyzed. Next, the internal structure of the existing exhaust mufflers are optimized by the simulation software. And finally the results are verified by experiments. The results show that at a specific speed (1500 rpm/min), the second-order noise is reduced by 3 dB (A). And at the same time, the total sound pressure level caused by the air flow drops significantly in the high-speed range and almost can meet customer requirements.

The tailpipe noise of a certain type of exhaust system can not meet the customer's target. Then the simulation model was modified by combining GT-power simulation and experimental data. The model was solved again and simulation and test data have higher consistency. Next GT-power and modeFRONTIER were used to optimize the internal structure of the exhaust muffler. The results show that the modified model can improve the accuracy of simulation calculation. At the same time, through reasonable optimization settings, the order of attention noise has been greatly improved to meet customer requirements at a specific speed of 2000-4000 rpm.

Key words: Exhaust system noise; GT-Power; modeFRONTIER; Optimization of noise

1 引言

发动机排气噪声是汽车主要噪声源之一, 通常比整机噪声高 $10\sim 15$ dB(A), 约占汽车噪声的 $1/3$ 。目前市场上主要通过消声器对发动机进行降噪。排气声学的有八大声学问题, 主要有驻波、低频阶次噪声、高频气流噪声、壳体模态共振噪声等。针对不同的问题, 会有不同的解决方法。比如驻波, 可通过打断过长管道或增加调音腔来解决。低频阶次, 可以通过增大效应器体积等方法。这是一个长期积累的过程, 需要在多次设计和验证之后, 才能较好解决排气声学问题。

在排气噪声性能开发前期和优化环节, 传统的经验设计和实验验证耗时耗力。仿真软件以其周期短、成本低、所需资源少的优势, 占有越来越重要的地位。目前国内, 边杰、季振林等采用一维仿真软件, 得出了不同消音器参数对尾管辐射噪声的影响^[1]。侯献军等通过 GT-Power 对某款车型的消声器插入损失进行了详细分析^[2]。程春等使用 Fluent 和 Sysnoise 对消声器多个单元进行了传递损失研究^[3]。黄泽好等利用仿真软件对多种消音器的插入损失进行了类比分析^[4]。葛蕴珊等通过三维声学软件和参数化模型对比分析了两者之间的传递损失的差异^[5]。由于多种原因, 仿真和实验结果还存在一定偏差。如何提高仿真精度, 并且在有限时间内得到最优的排气声学结果已成为各个排气公司的核心技术之一。

排气声学开发不仅关系到整车 NVH 性能, 同时还对车辆外部噪声有重要影响, 因此需要重点关注。本文以某款车型为研究对象, 运用 GT-Power 仿真软件和 modeFRONTIER 优化软件对排气尾管噪声进行深入分析和优化设计, 用以满足客户目标。

2 研究理论

目前在实际工程项目中, 经常需要在有限时间内和特定条件下寻找目标的最优解。人工寻优时间长效率低, 同时很难找到最优值。modeFRONTIER 是一款智能寻优软件, 设置好结构因子、目标、DOE 方法等参数后, 可以高效精确的求解最优值。本文通过该软件对排气尾管声学多目标进行优化, 流程如下图 1。



图 1 排气尾管声学优化流程

对于多目标问题，一般数学模型描述如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimize } f(x)=f_m(x) \\ \text{s.t. } g_j(x) \leq 0 \\ h_k(x)=0 \\ x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(H)} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} m=1,2,3,\dots,M \\ j=1,2,3,\dots,J \\ k=1,2,3,\dots,K \\ i=1,2,3,\dots,I \end{array}$$

多目标优化过程一般可以分为两个部分。第一部分为求解 Pareto 最优值的过程，由于设计变量不止一个，设计空间是多维的，在此空间对多目标寻优十分困难。第二部分是在 Pareto 的最优解中选择合适的权衡解，此时需要决策者参与选择。传统的多目标寻优方法是给定不同目标特定的权重值，然后将多目标问题转换为单目标来求解。该方法计算简单，但是每次计算相对独立，对于多峰值函数可能得到不同的结果。近年来，智能算法也运用到了多目标问题上，如遗传算法、模拟退火法等。它们可以在局部和全局进行寻优，且人工干预少，提高了优化效率和精度。

3 数值计算

本文分析对象为一款新车型，该车型的上一代取得了很大的市场。新车型为它的改款，功率有所提升。在 GT-Power 软件中，首先将客户提供的发动机模型进行导入，并设置好热端参数。然后根据实际排气系统冷端结构进行建模，包括中消、连接管管道、后消、尾管等，同时设置它们的初始条件，壁面温度等参数信息。

由于研究车型为小改款，中后消结构参考原车型建立初版。如果能满足客户需求，可以减少大量开发和生产费用。在 GEM 3D 中建立模型如下图 2 所示。中消中含有包括一块挡板和玻璃纤维；后消中具有两块挡板和两根管道。这两种结构在通常情况下可以兼顾发动机背压和尾管噪声需求。



图 2 消声器结构

在 GEM 3D 模块将消声包结构离散后导入 GT-Power 中，并和发动机模型、管道模型相连接。最后可得完整的整车声学模型如图 3 所示。

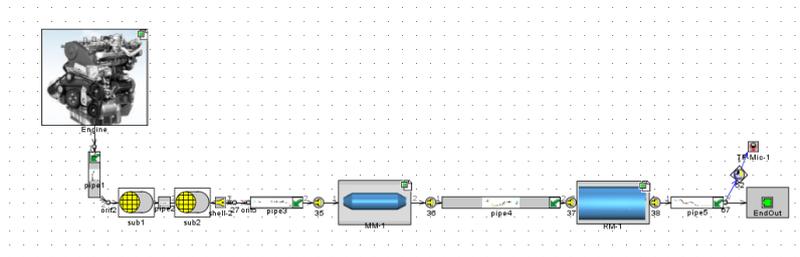


图 3 整车 GT-POWER 模型

在求解声学结果前，需验证背压值，背压是制约消声包结构设计的重要因素之一。客户要求冷端在 5500rpm/min 时冷端背压不能超过 25KPa。该结构经过计算后，背压为 23.1KPa，满足客户要求。接着进行声学仿真，经过一定时间计算后，可得到该车型的尾管噪声结果。由于该方案可延续前款车型的模具，无需重新开模，所以先进行试验验证。在距离尾管 45° 的 500mm 处布置声学麦克风。并在冷端之前接入背压和热电偶传感器，这样可以同时记录声学 and 背压数据。测试过程中，需关注车辆状态，在刚开始测试时，由于车辆处于冷车状态，需要先进行热车。尤其要关注加速时间和冷端进气温度，这两个参数的一致性关系到数据的准确性。热车后，多测几组数据，等数据一致性较

高时，才可以作为实验结果。

背压方面，5500rpm/min 时实验值为 22.3KPa，接近仿真值。尾管声学的仿真结果和实验结果数据如图 4，其中虚线为目标线，三角线为仿真，实线为实测数据。可以看出，在大部分转速，仿真和实验结果具有相似的趋势，但是在某些转速的特定阶次还存在一些偏差。

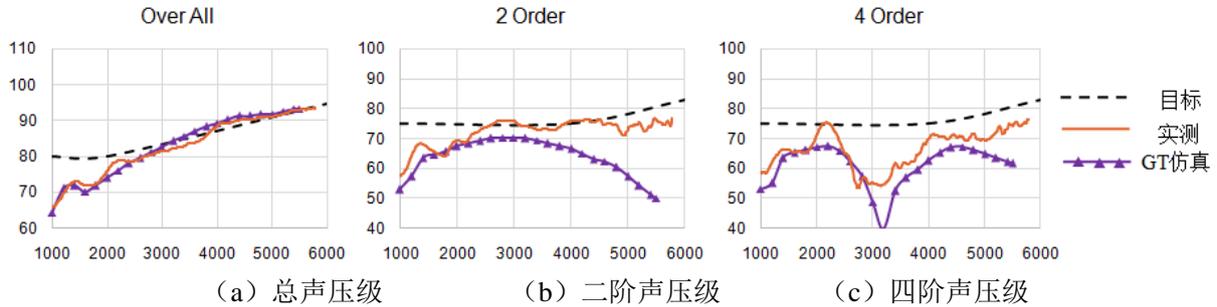


图 4 仿真与实验数据对比

本文结合实际测试和仿真结果，对仿真声源进行修正，得到修正的质量流声学模型。再次进行仿真，流程如下图 5。最后的声学仿真和实验结果如图 6 所示，两者更为匹配，具有较高的参考意义。在二阶声压级图中，两者在 2800rpm/min 附近拟合度很高。同时在四阶声压级图中，在 2200rpm/min 转速附近存在与实验相似的峰值。整体来说，修正后的声学模型极大的提高了仿真精度。

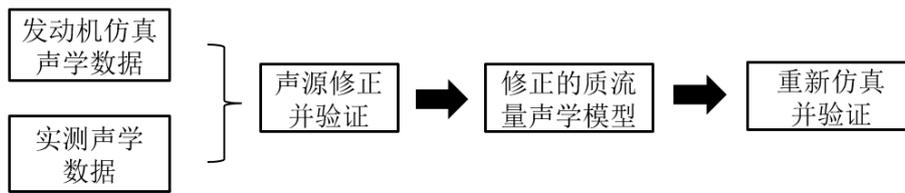


图 5 声源修正流程

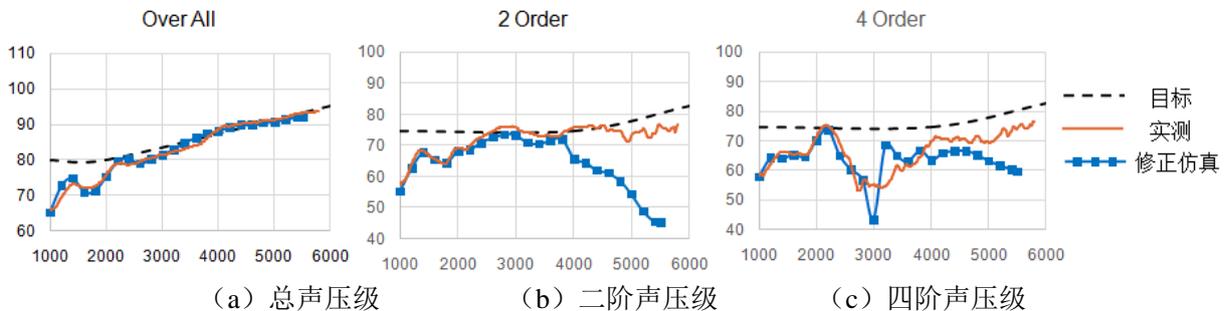


图 6 修正后仿真数据与实验数据对比

4 优化分析

和客户沟通后，决定以现有结果为基础，对该排气尾管声学的二阶 2800rpm/min、二阶 3000rpm/min 和四阶的 2200rpm/min 进行优化。主要通过 modeFRONTIER 优化软件更改后消声器内部结构来实现。根据后消结构及经验，选择合适的优化参数，分别为进口管直径、长度，第一腔进口管打孔数、出口管直径、两块挡板打孔数如下图 7 所示。

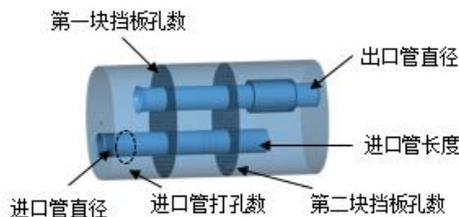


图 7 后消声器结构优化参数

构建的 modeFRONTIER 模型，DOE 方法选择超拉丁方，用以确保数据样本的均匀性。优化算法选择 pilOPT 方法，该方法能够兼顾全局优化和局部优化的优点，避免过长时间的全局寻优和陷入局部最优解。在计算声学之前，先确保优化后的方案必须满足背压条件。所以先通过判断模块进行筛选，不满足背压的方案不再计算声学。在计算过程中，实时监控关注的二阶和四阶的结果气泡图如图 8 所示，在图中可以快速得到各个方案的优化结果值。在经过多次计算后，方案 73 可以兼顾二阶和四阶的优化目标值，结果相对最优。

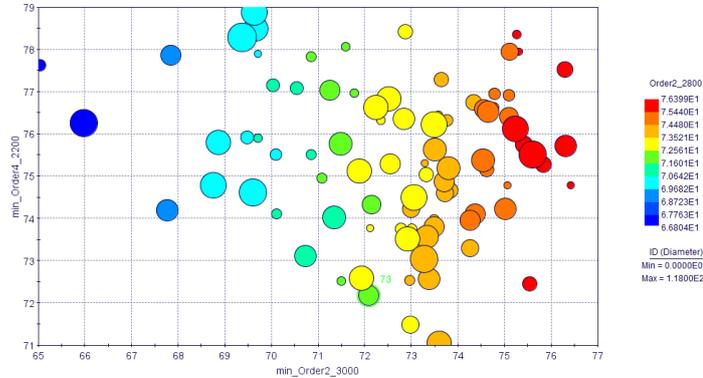


图 8 结果气泡图

原结构和优化后的方案 73 参数对比如下表 1 所示。两者的声学结果对比如图 9 和表 2 所示。由表可知，新方案在 2800rpm/min 二阶处下降了 1.6 dB (A)，3000rpm/min 二阶处下降了 0.9 dB (A)，2200rpm/min 四阶处下降了 1.6 dB (A)，声学结果改善明显。新结构背压值为 24.2KPa，同样满足客户要求。

表 1 原方案和优化结构参数对比

结构参数	进口管直径 (mm)	进口管长度 (mm)	出口管直径 (mm)	进口管打孔数 (个)	第一块挡板孔数 (个)	第二块挡板孔数 (个)
原结构	55	400	55	26	317	259
新结构	55	425	50	38	287	259

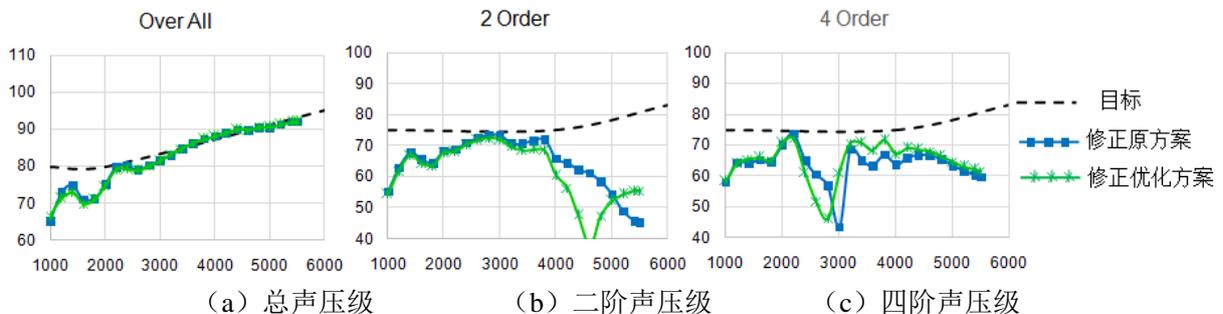


图 9 原方案和优化结构声学结果对比

表 2 原方案和优化结构声学关注值对比

仿真结果	背压值 (KPa)	二阶/2800rpm(dBA)	二阶/3000rpm(dBA)	四阶/2200rpm(dBA)
原结构	23.1	73.6	73.4	73.8
新结构	24.2	72.0	72.5	72.2
改善	-1.1	1.6	0.9	1.6

通过后处理，可以得到输入和输出参数之间的关系，如图 10 所示。可以看出，在该系统后消音器中，进口管直径对尾管二阶影响最大，第一块挡板孔数对四阶影响较大。因此通过 modeFRONTIER

软件除了能找到合适的最优外，还能得到各个参数的对结果的敏感度，方便后期对排气声学的深入研究。同时也可以通过后处理更改目标值的区间，软件可以自动选择合适的方案，如图 11 所示。

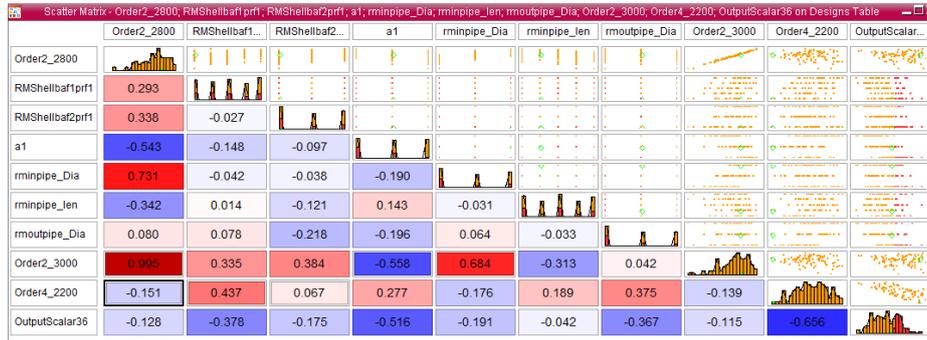


图 10 输入和输出参数的关系

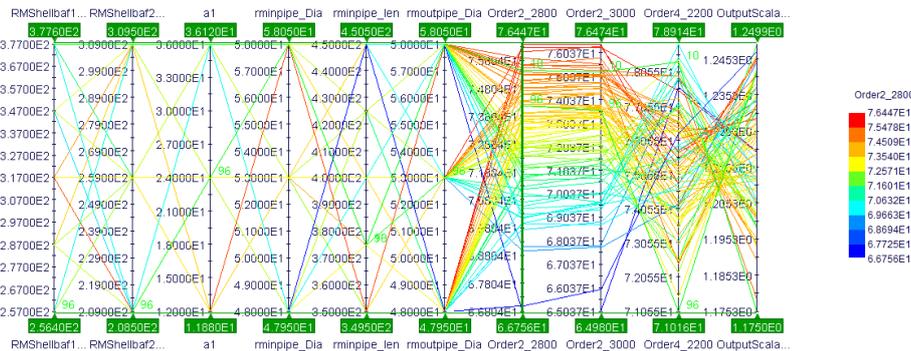


图 11 输入和输出数值关系

5 结论:

本文采用 GT-Power 仿真软件对某车型排气系统噪声进行分析。并根据测试结果对声源进行修正，然后通过 modeFRONTIER 软件对消声器结构进行优化，降低了发动机尾管噪声。得出结论如下：

- (1) 在该系统中大部分转速下，GT-Power 在排气声学仿真和实验结果趋势接近，可作为排气尾管声学前期评判标准。
- (2) 修正的质量流声学模型可以进一步提高仿真精度，与实验结果更为匹配。
- (3) 通过 modeFRONTIER 软件可以快速构建排气声学的 DOE 模型和相应的优化算法，在较短时间内得到声学结构的最优解。

6. 参考文献:

- [1] 边杰, 季振林等. 消声器结构对排气噪声和发动机性能的影响 [J]. 汽车工程, 2010, 33: 542-546.
- [2] 侯献军, 刘庆等. 基于 GT-Power 的汽车排气消声器性能分析及改进[J]. 汽车技术, 2009, 1: 38-40.
- [3] 程春, 李舜韶等. 传递矩阵法的排气消声器声学性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33: 126-130.
- [4] 黄泽好, 黄一桃等. 某乘用车排气系统设计及改进[J]. 小型内燃机与摩托车, 2012, 6: 62-65.
- [5] 葛蕴珊, 张宏波等. 汽车排气消声器的三维声学性能分析[J]. 小型内燃机与摩托车, 2006, 1: 51-55.
- [6] 国家环境保护总局. 汽车加速行驶车外噪声限制及测量方法 GB1495—2002 [S].
- [7] 刘勇强, 左承基, 黎幸荣. 发动机排气噪声测量方法的实验研究. 噪声与振动控制, 2011; 31 (1) : 179—183
- [8] 孟德洋. 轿车消声器声学特性仿真分析. [D]. 吉林大学, 2007.
- [9] 颜伏伍, 杨伦, 刘志恩, 等. GT-Power 软件的微型车消声器设计与优化[J] . 内燃机工程, 2010,

31 (2) :64 -67.