

GT-POWER 在进气系统赫姆霍兹谐振腔分析中的应用

Application of GT-POWER in Intake System Helmholtz Resonator Analysis

陈琳

(重庆长安汽车工程研究院)

摘 要: 本文使用一维气体动力学仿真软件 GT-POWER 对进气系统谐振腔进行了传递损失模拟分析。并在消声室使用 B.K 测试系统对某进气系统进行了传递损失测试, 结合整车上进气系统进气口噪声测试结果, 综合考查和研究进气系统谐振腔的消声作用和消声机理。研究表明, 进气系统谐振腔当容积比较大的时候, 会出现高次波, 其消声频率会出现几个大的峰值, GT-POWER 能很好的将这些消声频率模拟计算出来。

关键词: GT-POWER、进气系统、传递损失、进气口噪声、谐振腔

Abstract: In this paper, the 1D aerodynamics simulation software code GT-POWER was used for the intake system resonator transmission loss analysis. The transmission loss test by the B.K test system was did in the semianechoic room, and also the intake system orifice noise test on the vehicle, in order to study and research the mechanism and effective of the intake system resonator comprehensively. The study shows that when the volume of the intake system resonator is very big, the high wave will come out, and multiple big peak will come out on transmission loss curve. The software GT-POWER can simulate this characteristic accurately.

Key words: GT-SUITE、Transmission Loss、Air Induction System、Intake System Orifice Noise、Resonator

1 前言

进气系统是汽车发动机空气管理系统的重要组成部分。通常所说的进气系统, 指的是从节气门体至进气口的之间的管道结构, 主要包括柔性连接管、1/4 波长管、空气过滤器、赫姆霍兹谐振腔、前进气导管和后进气导管等等。进气系统设计过程中, 噪声控制与优化是一个重要的工作内容, 经常使用的消声元件有扩张式的消声元件, 如空滤器, 以及旁支型消声元件, 如 1/4 波长管和赫姆霍兹谐振腔。

赫姆霍兹谐振腔是旁支型消音元件的一种, 如图 1 所示。赫姆霍兹谐振腔是一种历史悠久的消音器, 它由一个消音容积和一根短管组成, 短管与主管连接。赫姆霍兹谐振腔作为进气系统噪声优化中一个重要的消声元件, 其结构简单, 且具有较好的低频消声性能, 而被广泛应用于发动机进气系

统低频消声上。其消声机理就是入射波在主管中运动，当到达消音容积时，一部分被反射回来，另一部分分成两个分路。一路进入在容器里，推动容器内的空气运动，另一路继续在主管中传播，形成透射波。由于管道交界处声阻抗的变化，从而达到消音目的。赫姆霍兹谐振腔因其消声带宽较窄，确定其共振频率就显得至关重要。GT-POWER 能通过传递损失分析，来预测赫姆霍兹谐振腔的共振频率，其计算准确度很高，正好满足工程设计对这方面的要求。

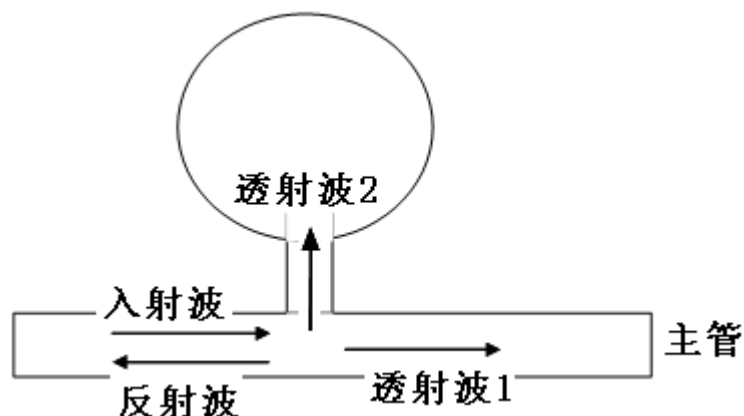


图 1 赫姆霍兹谐振腔示意图

GT-POWER 是一维的气体动力学仿真软件，它能分析一个时域信号，并且通过傅立叶变换把这个信号转化成频域信号，这就是 GT-POWER 中标准的声学求解器所完成，即非线性声学的分析能力。另外，它还能够频域范围内计算各类系统的频率响应，也就是线性声学的分析能力。由于它不是一个纯声学软件，所以在管道声学分析的时候，通过一维流体力学分析，提取压力波动信号，再通过声学方程的变换和傅立叶变换，得到各种声学结果。

2 GT-POWER 传递损失计算理论介绍

2.1 消声元件流场计算原理

在GT-POWER建立传递损失模型，首先需要建立消声元件的模型，而消声元件本质上都是一些管道系统，必须划分网格离散才能计算求解。GT-POWER采用一维交错网格，将管道系统分成若干个控制体积，应用有限体积法进行数值计算，标量在网格中心计算，如压力、温度等；矢量在网格的界面计算，如速度、质量流量等。GT-POWER计算求解的过程，本质上就是求解一维气体动力学基本控制方程，也就是如下的流体力学的三大基本方程：

$$\text{连续性方程: } \frac{dm}{dt} = \sum_{\text{boundaries}} mflx$$

$$\text{动量方程: } \frac{d(mflx)}{dt} = \frac{dpA + \sum_{\text{boundaries}} (mflx * u) - 4C_f \frac{\rho u^2}{2} \frac{dxA}{D} - C_p \left(\frac{1}{2} \rho u^2\right) A}{dx}$$

$$\text{能量方程: } \frac{d(me)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \sum_{\text{boundaries}} (mflx * H) - hA_s (T_{fluid} - T_{wall}) \quad (\text{显示求解})$$

$$\frac{d(\rho HV)}{dt} = \sum_{boundaries} (mflux * H) + V \frac{dp}{dt} - hA_s(T_{fluid} - T_{wall}) \quad (\text{隐式求解})$$

上式中：

$mflux$ 是通过边界的质量流量；

m 、 V 、 p 分别为单元内的质量、体积和压力；

A_s 为流通面积；

e 、 H 分别为内能和总焓；

h 为传热系数；

u 为体积单元的边界速度；

C_f 为表面摩擦系数；

D 为当量直径；

C_p 为压力损失系数；

T_{fluid} 和 T_{wall} 分别为流体温度和壁面温度

通过定义边界的速度和温度条件，以及空气成分，密度，就可以按照上面的流体力学三大基本方程来求解每一个单元的压力。GT-POWER标准的数值求解都是在时域中进行的，所以计算得到压力信号也是时域的。

2.2 传递损失计算原理

GT-POWER中有专门计算传递损失的模块，其标准模块名叫做AcoustTransLoss。这个模块通过处理4个麦克风采集的4组压力信号来进行传递损失计算，通过传递损失分析来衡量消声元件对声音的衰减特性。

GT-POWER软件计算传递损失所采用的技术来源于Chung, J. Y.和D. A. Blaser.在1980年9月发表于美国声学协会期刊第68卷编号3的论文 “Transfer Function Method of Measuring In-Duct Acoustic Properties, Part1, Theory” 所介绍的方法。这种分析方法通过把每一个测量点的压力波动信号分解成向前的入射波和向后的反射波两部分，根据声波传播的波动方程，分别在系统的两个位置：一个在消音元件的上游，一个在消音元件的下游都进行这种分解，这样就可以求解出上游的入射声压和下游透射声压，再根据自相关和互相关谱得到声功率级之差。上游和下游的两组麦克风必须距离很近，大约距离1~2离散长度，并且麦克风必须与消声元件的进口和出口很近，这样将摩擦和热传递对传递损失的影响降到最低，其原理图如下图2所示

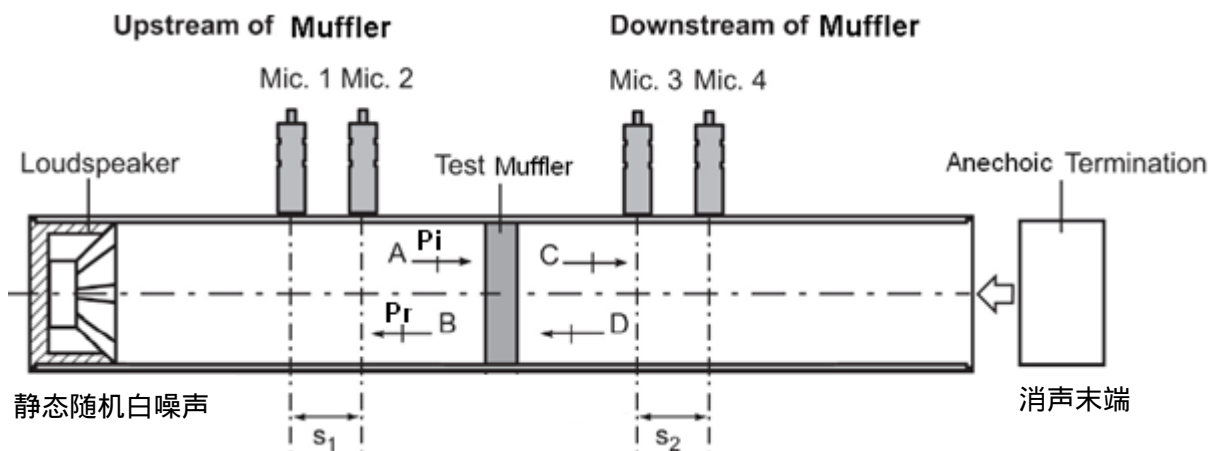


图 2：传递损失模拟计算原理图

不同位置麦克风的压力分解：

$$p_1(t) = p_{1i}(t) + p_{1r}(t)$$

$$p_2(t) = p_{2i}(t) + p_{2r}(t)$$

$$p_3(t) = p_{3i}(t) + p_{3r}(t)$$

$$p_4(t) = p_{4i}(t) + p_{4r}(t)$$

$p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$ 分别为Mic.1 , Mic.2 , Mic.3和Mic.4计算的总压力；

$p_{1i}(t)$, $p_{2i}(t)$ 分别为Mic.1 , Mic.2计算分解的入射压力；

$p_{3i}(t)$, $p_{4i}(t)$ 分别为Mic.3和Mic.4计算分解的投射压力；

$p_{1r}(t)$, $p_{2r}(t)$, $p_{3r}(t)$, $p_{4r}(t)$ 分别为Mic.1 , Mic.2 , Mic.3和Mic.4计算分解的反射压力；

为了计算入射声压A或投射声压C，考虑到要确定相位，往往会以消声元件上游或者下游中某一个麦克风的计算值作为参考值，去表达另一个麦克风的计算值，最后计算得到参考麦克风的入射声压或投射声压。取Mic.1和 Mic.3计算得到的压力信号为参考值，即Mic.1的入射压力为A，反射压力为B；Mic.3的投射压力为C，反射压力为D，计算公式如下所示：

消声元件上游：

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=0_u} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=s_1}$$

$$\begin{aligned} p|_{x=0_u} &= A + B & p|_{x=s_1} &= Ae^{-jkd} + Be^{jkd} \\ v|_{x=0_u} &= \frac{A-B}{\rho c} & v|_{x=s_1} &= \frac{Ae^{-jkd} - Be^{jkd}}{\rho c} \end{aligned}$$

消声元件下游：

$$\begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=0_d} = \begin{bmatrix} T'_{11} & T'_{12} \\ T'_{21} & T'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}_{x=s_2}$$

$$\begin{aligned} p|_{x=0_d} &= C + D & p|_{x=s_2} &= Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\ v|_{x=0_d} &= \frac{C-D}{\rho c} & v|_{x=s_2} &= \frac{Ce^{-jkd} - De^{jkd}}{\rho c} \end{aligned}$$

入射声压和投射声压的关系用如下的传递矩阵表示：

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}$$

则传递损失表达式如下：

$$TL_n = 10 \log_{10} \left(\left| \frac{A}{C} \right|_{D=0}^2 \right) = 10 \log_{10} \left(\left| a_{11} \right|^2 \right)$$

为了减少计算误差，上面的压力时域信号会经过傅立叶变换，通过自相关和互相关谱得到声功率级之差。

3 传递损失计算模型建立

3.1 建立消声元件模型

现在模拟某进气系统中的一个实际的谐振腔，建立谐振腔模型，如图3所示



图 3：谐振腔模型

3.2 建立传递损失的模型

GT-POWER中有已经建立好的计算传递损失的实例，如图4所示

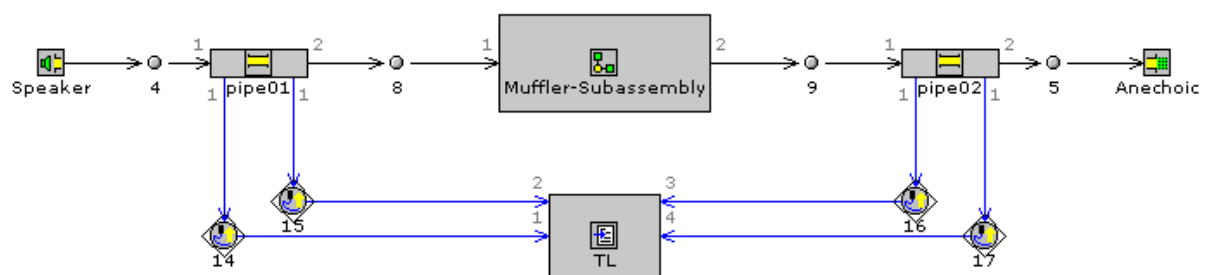


图4：传递损失计算模型图

建立自己的消声元件传递损失计算模型，只需要将装配模块去掉，换成自己建立的消声元件模型即可，如图5所示

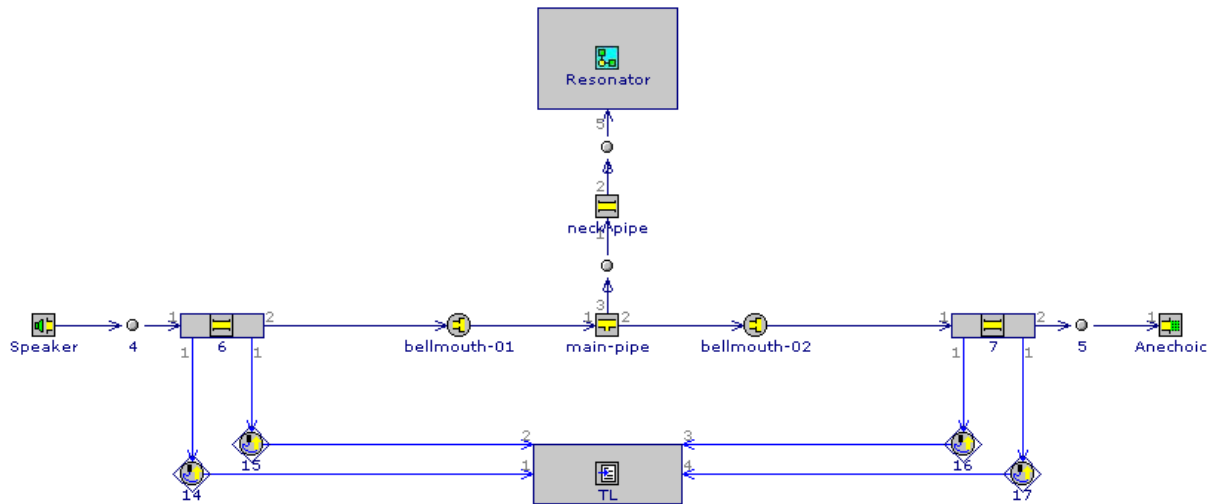


图 5：谐振腔传递损失计算模型

模型中设置边界条件以及其它零件属性如下表

表1传递损失计算参数设置表

Part name	属性	属性值	备注
Speaker	Mean Velocity	0.01m/s	尽量取小些，模拟静态随机白噪声，但是如果取 0，收敛会很慢，推荐取 0.01
	Velocity Amplitude	0.2	速度波动幅值
	Temperature	294K	测试环境温度
	Maximum Frequency	1500Hz	计算频率范围 10~1500Hz
	Frequency Step	5Hz	频率步长，每个值的频率间隔
TL	High Frequency Filter	24	按照推荐值
	Discretization Length	10mm	离散长度设置，满足 1500Hz 范围内计算需求

最后求解，按照上面的流体力学三大方程，得到4组压力数据，再按照传递损失计算原理来进行分解，得到入射声压和透射声压，最后对声压进行傅立叶变换，通过自相关和互相关谱得到声功率级之差，即传递损失结果。

4 分析与测试结果

4.1分析结果

图5所示谐振腔结构，其传递损失计算结果如下图6所示

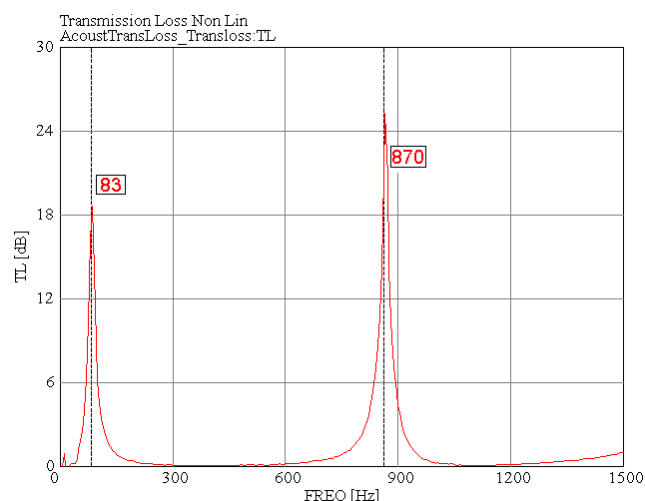


图 6：谐振腔传递损失计算结果

计算结果表明，此谐振腔在1000Hz以内，有两个共振峰值，分别为83Hz和870Hz左右，并且870Hz的共振频率消声量更大。

4.2测试结果

对进气系统进行传递损失测试，采用B&K的阻抗管来进行。测试连接图如下图7所示



图 7：某进气系统传递损失测试图

由于此谐振腔是安装在某进气系统上，而且与进气管是一体的，测试中没有将其单独分离出来，而是和进气系统一起进行测试。其测试与模拟结果如下图8所示

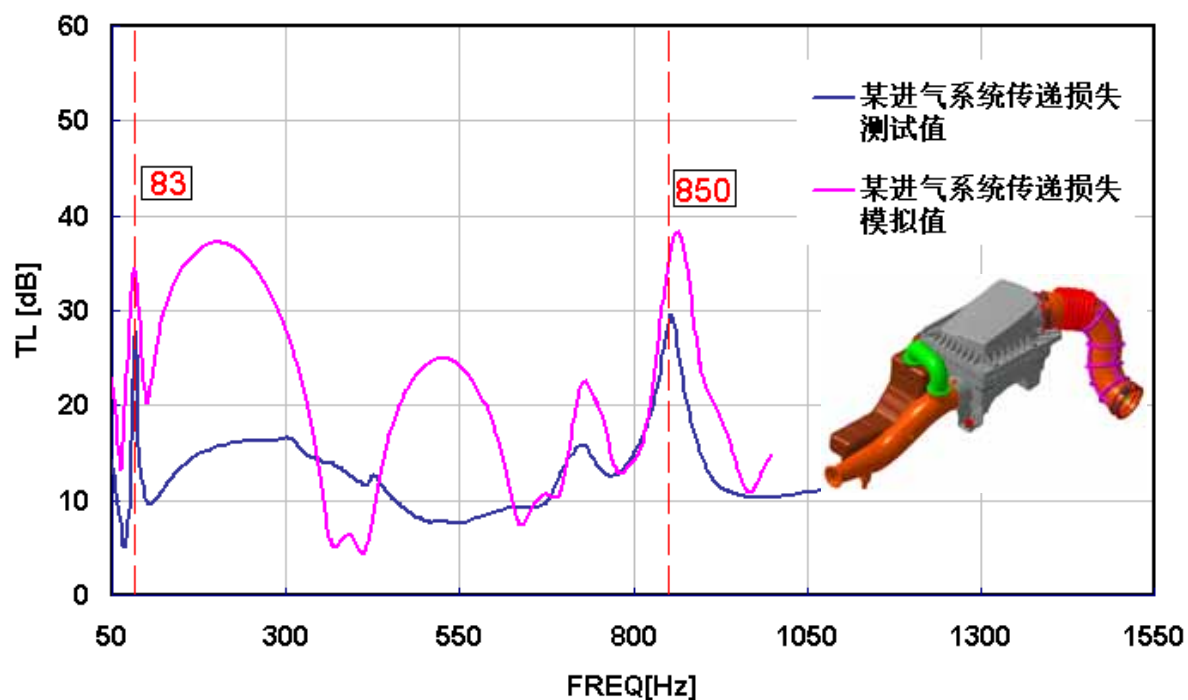


图 8：传递损失模拟与测试值对比图

为了验证谐振腔的消声频率，进行了谐振腔的对比试验，试验结果如图9所示

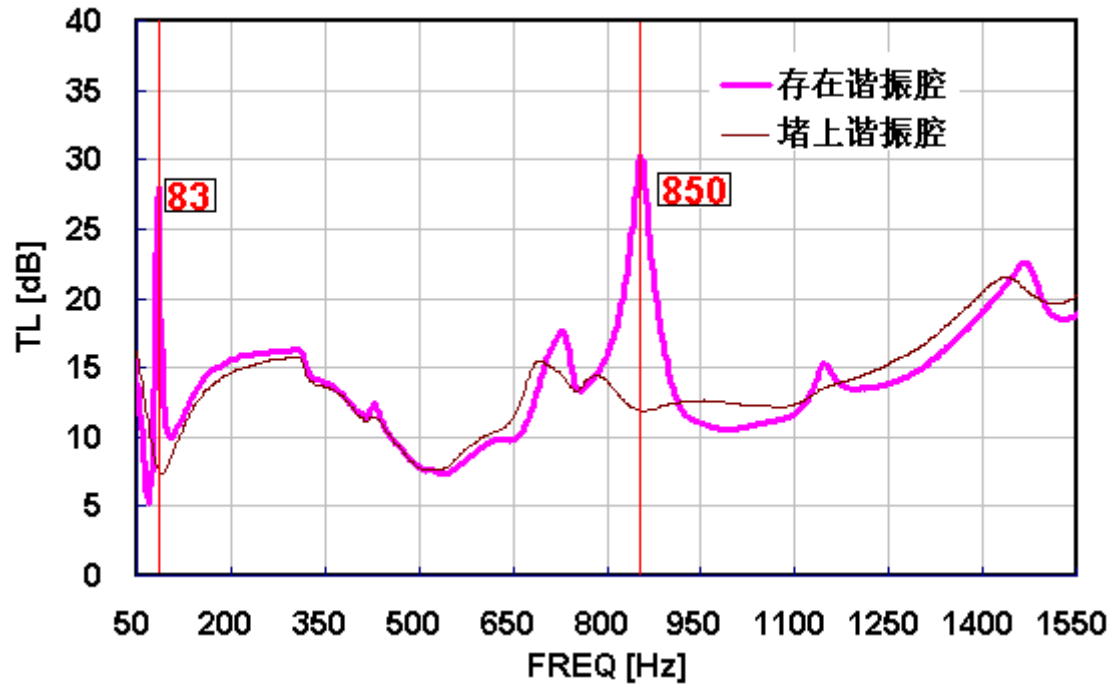


图 9：谐振腔消声频率验证

对比传递损失的贡献量以及所消除的共振频率，如图10所示。

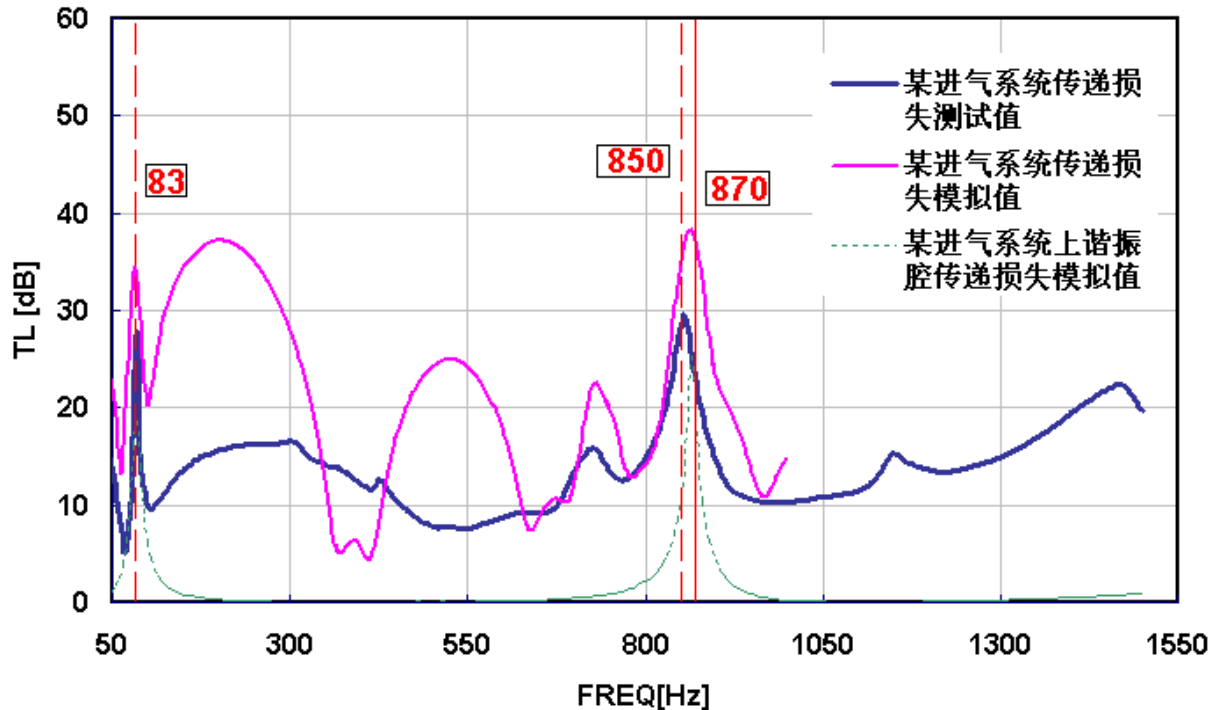


图 10：谐振腔传递损失与进气系统传递损失对比图

由此进气系统传递损失测试与分析结果对比可知,谐振腔确实在 83Hz 和 850Hz 附近有两个共振频率,GT-POWER 预测结果是在 83Hz 和 870Hz 附近有两个共振频率,因此试验结果与 GT-POWER 预测的吻合度很高。

此进气系统安装在整车上进行进气口噪声测试,分两种状态,去掉谐振腔和保留谐振腔的结果对比,如下图 11 所示

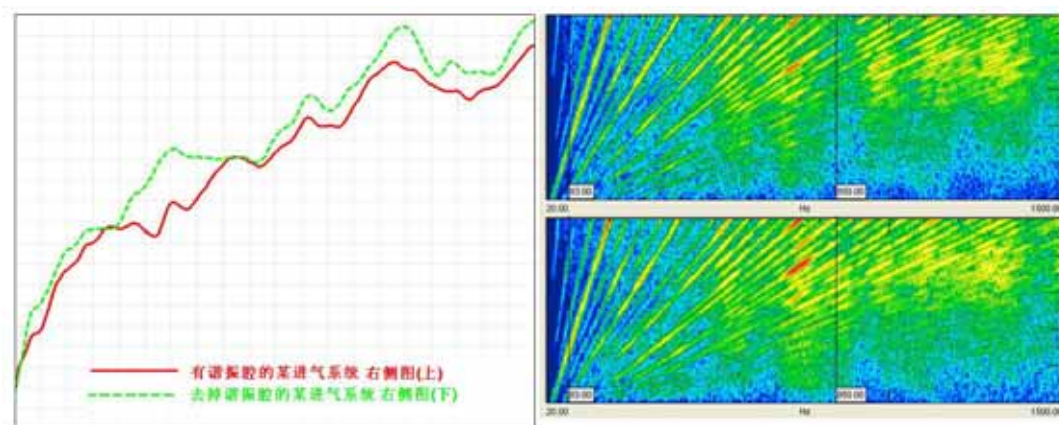


图 11：整车进气口噪声测试结果——对比谐振腔降噪效果

由进气系统在整车上的测试结果知,安装有谐振腔时,进气口噪声在 83Hz 和 850Hz 附近都有很大的下降,并且 850Hz 附近的噪声衰减的比 83Hz 还多,更加证明了 GT-POWER 软件预测的准确性,只是在高频计算上,实际的 850Hz 与模拟的 870Hz 有点差别。

5 总结

1. 本文使用GT-POWER软件对容积比较大的谐振腔进行了传递损失的计算,发现大谐振腔存在多个共振频率,并结合试验对软件模拟结果进行了验证。
2. 对于谐振腔传递损失特性上出现的多个峰值,给出的结论是当谐振腔容积比较大的时候,声波的传播已经不是按照平面波传播,会表现出三维传播的特征,形成高次波,在声模态上表现为纵向模态。
3. GT-Power 是一种优秀的发动机性能模拟与仿真软件,被称为“虚拟发动机”。它丰富的解析机能,准确的物理模型和简单而方便的建模方法,适用于对各种发动机进行性能仿真。其声学模块功能强大,包括线性声学和非线性声学,能进行传递损失,插入损失,管口噪声等各种声学分析。它为发动机及零部件的设计者提供了一种很好的CAE 分析工具,软件计算精度很高,可以有效地辅助设计者完成工程设计。

6 参考文献

- [1] 庞剑 谌刚 何华 编著 《汽车噪声与振动——理论与应用》北京理工大学出版社 2006.6

- [2] 马大猷 编著 《噪声与振动控制工程手册》机械工业出版社 2002.9
- [3] 何渝生 编著 《汽车噪声控制》机械工业出版社 1999.8
- [4] GT-Power V6.2 User Manual
- [5] B&K Pulseshop Manual