

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

朱亮亮

无锡威孚力达催化净化器有限责任公司

概述

□威孚力达公司简介

□排气声源识别

□基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

□结论



无锡威孚力达催化净化器有限责任公司
无锡威孚环保催化剂有限公司

公司简介



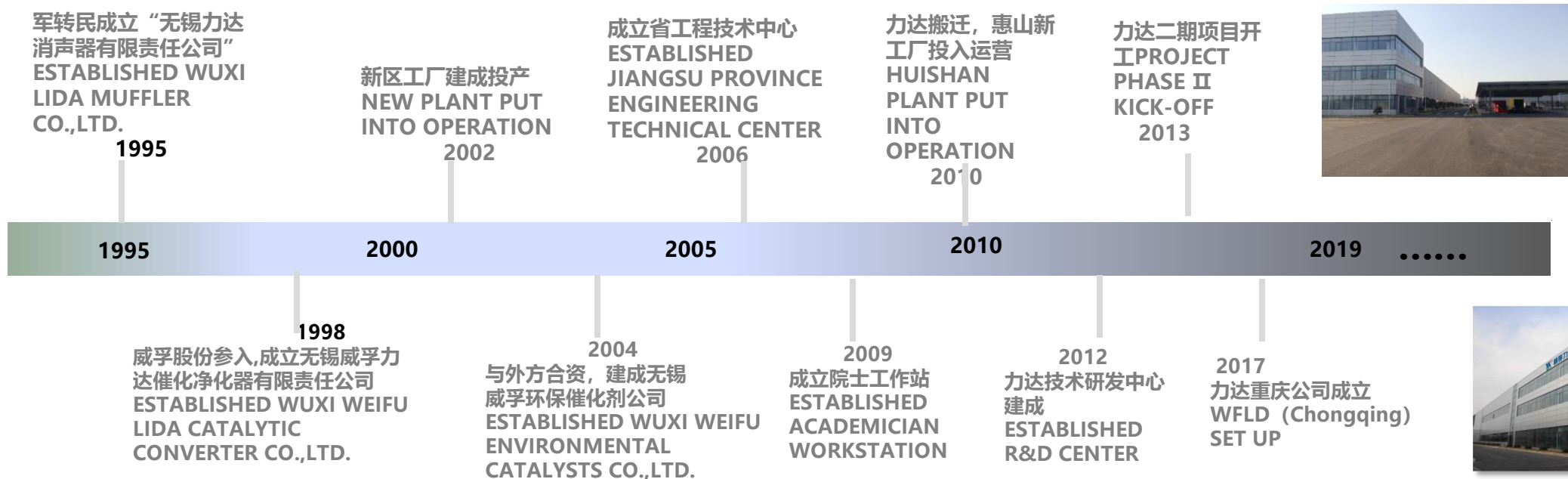
羊尖厂区, 1995



新区工厂, 2002



惠山新厂, 2010



主要产品

威孚力达主要产品 WFLD Products

催化剂 Catalysts

TWC, DOC, POC,
SCR, CDPF, MC
NMC, SFC, VOC



净化器 Catalytic Converter

Under-floor,
Manifold



消声器 Muffler



SCR系统、DPF系统 及集成

SCR、DPF System, including
Urea Pump, nozzle, DCU etc.



公司产品应用于轻型汽油车、轻型柴油车、重型柴油车、CNG、甲醇等特殊燃料发动机、摩托车、非道路机械等发动机的排气净化，可使整车、整机排放达到国III、国IV、国V、国VI排放标准。
WFLD after-treatment product apply for light gasoline vehicle, LD, HD, CNG, motorcycle and OHW. The applied vehicle can meet China3,4,5,6 emission regulation.



概述

□威孚力达公司简介

□排气声源识别

□基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

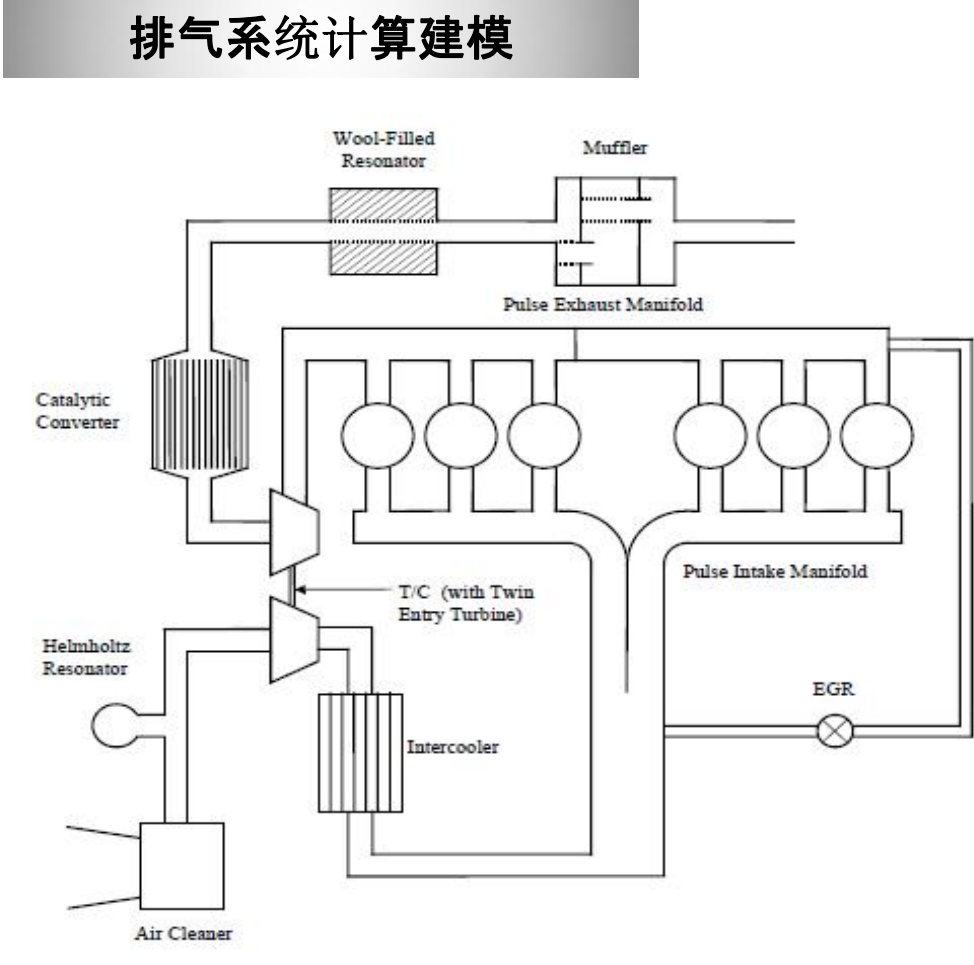
□结论



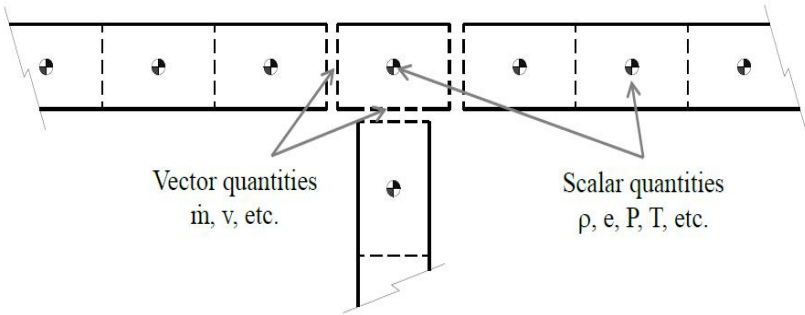
无锡威孚力达催化净化器有限责任公司
无锡威孚环保催化剂有限公司

排气声源识别

排气系统计算建模



发动机的工作过程模型图

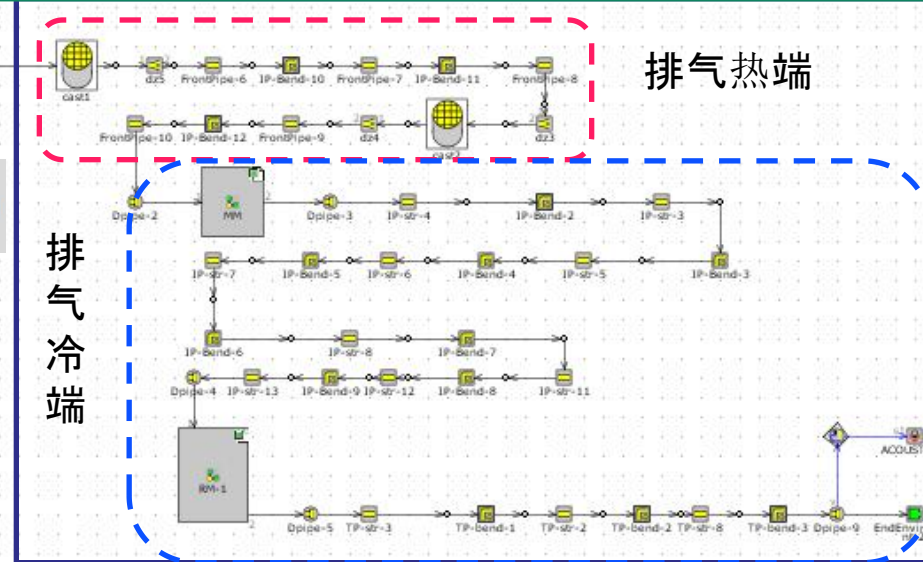
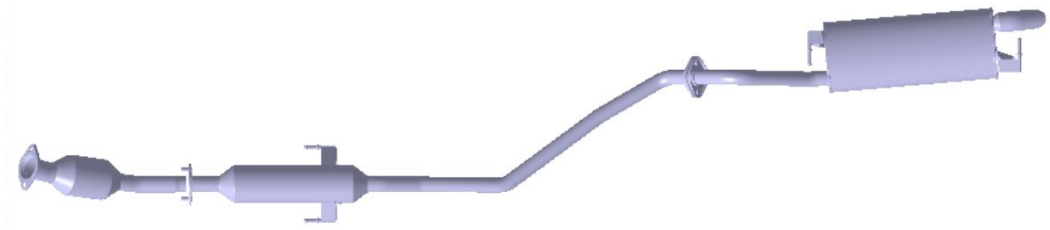
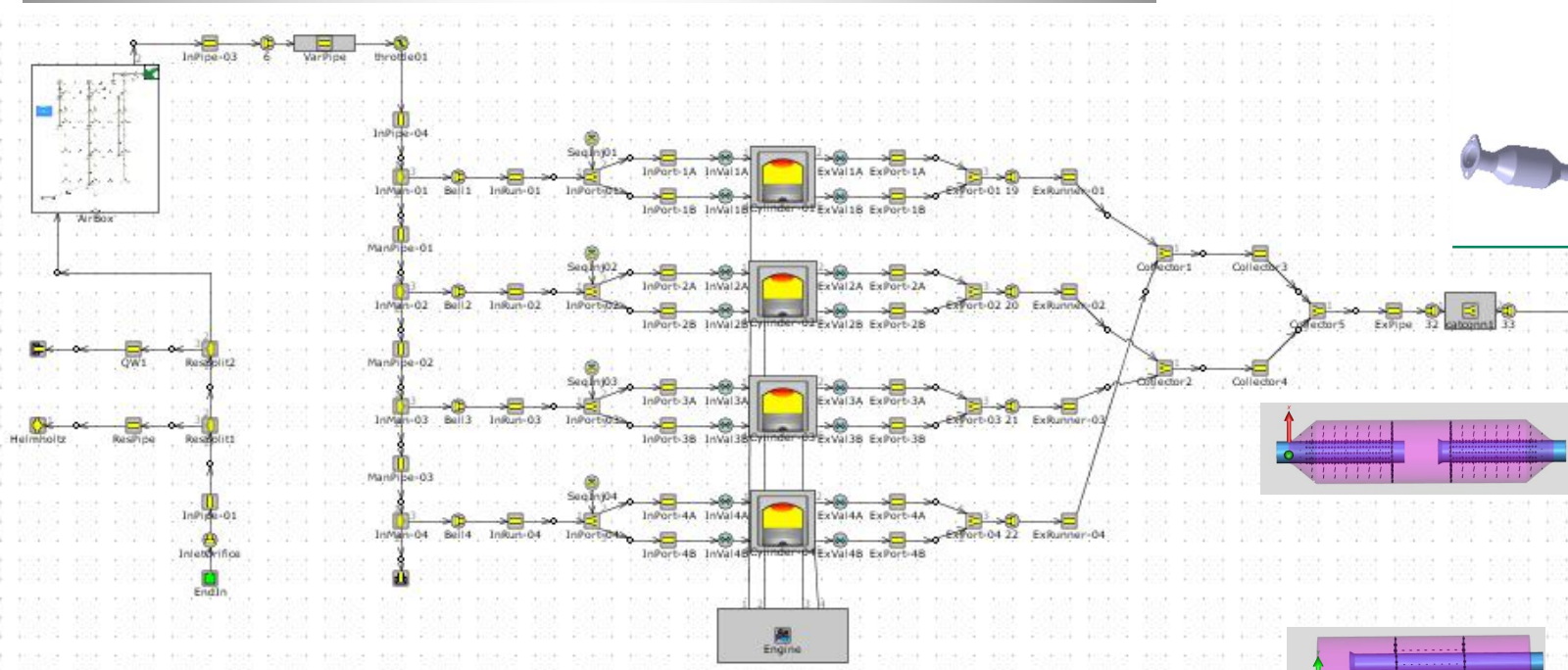


一维有限体积法离散示意图

方程类型	方程形式
质量守恒方程	$\frac{dm}{dt} = \sum_{boundaries} \dot{m}$
动量守恒方程	$\frac{d(\rho HV)}{dt} = \sum_{boundaries} (\dot{m}H) + V \frac{dp}{dt} - hA_s (T_{fluid} - T_{wall})$
能量守恒方程	$\frac{d(me)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum_{boundaries} (\dot{m}H) - hA_s (T_{fluid} - T_{wall}) \quad (\text{显式})$
	$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{dpA + \sum_{boundaries} (\dot{m}u) - 4C_f \frac{\rho u u }{2} \frac{dxA}{D} - K_p \left(\frac{1}{2} \rho u u \right) A}{dt} \quad (\text{隐式})$

排气声源识别

基于GT-Power的排气系统声学计算建模-非线性方法

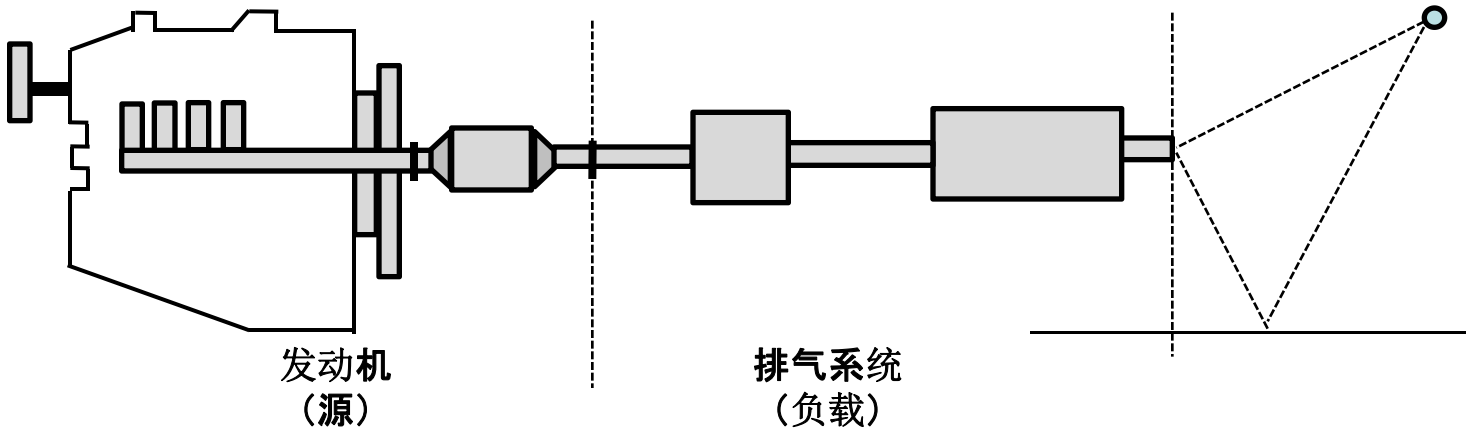


排气系统

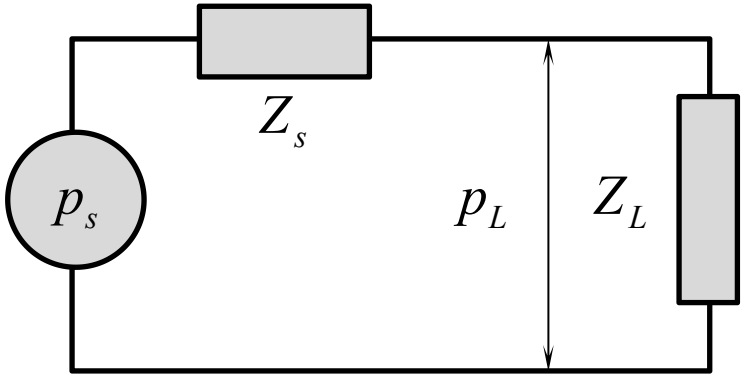
- 计算精度较高;
- 一般一个乘用车排气系统尾管噪声计算需要几个到十几个小时的计算;商用车后处理需要计算的时间更多;
- 由于排气系统消声器内组件的方案涉及较多, 计算时间更加多。

排气声源识别

排气系统声学计算建模-线性方法



排气系统源-负载图



电声类比

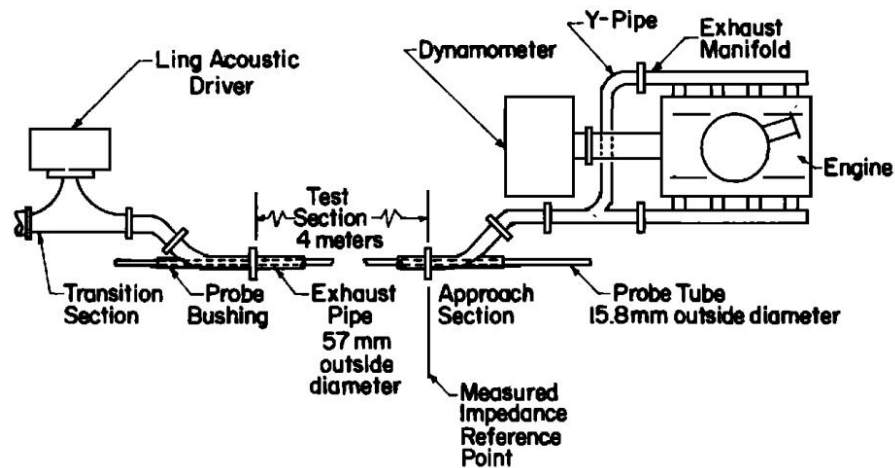
参数	物理意义
p_s	声源声压
Z_s	声源阻抗
p_L	负载声压
Z_L	负载阻抗

➤ 声源声压、阻抗与负载声压、阻抗之间的关系满足如下：

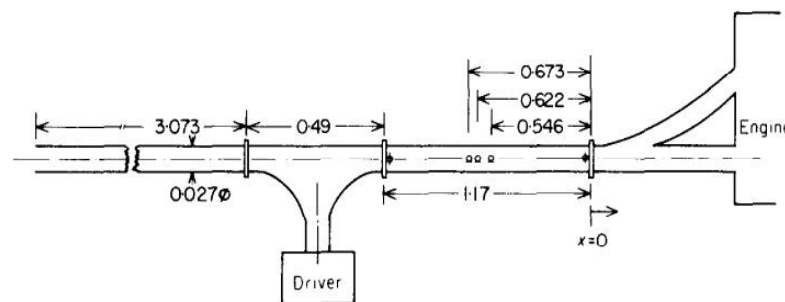
$$p_L = \frac{p_s Z_L}{Z_s + Z_L}$$

排气声源识别

直接测量



驻波管测量(驻波比方法¹)



驻波管测量(传递函数方法²)



- 需要提供一个次级声源, 同时进行排气管道内噪声测量;
- 由于发动机排气噪声较高, 且主要集中在中低频噪声, 为了准确测量低频噪声, 要求次级声源在低频的能量高于发动机。
- 实际很难找到这样的次级声源。

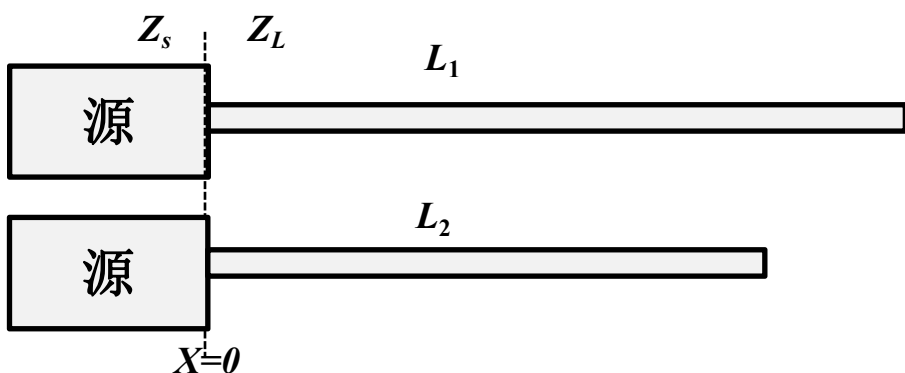
1. Ross, David F. Measurement of the acoustic internal source impedance of an internal combustion engine[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 74(1):18.
2. Prasad M G, Crocker M J. Studies of acoustical performance of a multi-cylinder engine exhaust muffler system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 90(4):491-508.

排气声源识别

间接测量方法

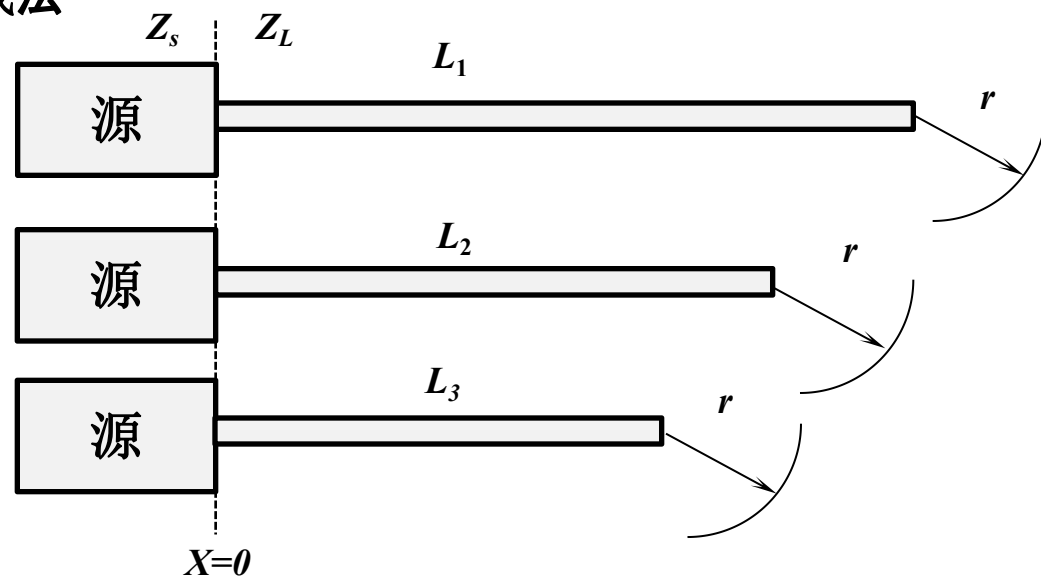
1. 两负载法

$$p_{Li} = \frac{p_s Z_{Li}}{Z_s + Z_{Li}} \quad i = 1, 2$$



- 两负载需要测量声源截面处的声压，负载阻抗可以通过计算得到，即可求出声源阻抗；
- 声压测量需要一个非声学的相位参考，实际中很难找到。

2. 三负载法



$$|p_{Li}| = \frac{|p_s| |Z_{Li}|}{|Z_s + Z_{Li}|} \quad i = 1, 2, 3$$

$$\alpha_m = \frac{|p_{L1}| / |Z_{L1}|}{|p_{Lm+1}| / |Z_{Lm+1}|} = \frac{|Z_s + Z_{Lm+1}|}{|Z_s + Z_{L1}|} \quad m = 1, 2$$

排气声源识别

间接测量方法

2.三负载法

$$\alpha_m = \frac{|C_1 Z_r + D_1|}{|C_{m+1} Z_r + D_{m+1}|} \frac{|p_1|}{|p_{m+1}|} \quad m = 1, 2$$

将管道内的声压 p_{Li} 测量, 换成管道外的声压 p_m 测量, 由于具有相同的管口辐射阻抗 Z_r , 可以通过传递矩阵得到。

$$\alpha_m = \frac{|C_1 Z_r + D_1|}{|C_{m+1} Z_r + D_{m+1}|} 10^{(L_{p1} - L_{pm+1})/20} \quad m = 1, 2$$

$Z_s = R_s + jX_s$ 与 $Z_{Li} = R_{Li} + jX_{Li}$ 带入方程, 并求平方。

$$(1 - \alpha_m^2)(R_s^2 + X_s^2) + 2(R_{Lm+1} - \alpha_m^2 R_{L1})R_s + 2(X_{Lm+1} - \alpha_m^2 X_{L1})X_s = \alpha_m^2 R_{L1}^2 + X_{L1}^2 - (R_{Lm+1}^2 + X_{Lm+1}^2) \quad m = 1, 2$$

- 三负载法, 将管内噪声测量转换到管外噪声测量;
- 管外噪声测量避免了相位测量。

3.传统四负载法

$$(1 - \alpha_m^2)(R_s^2 + X_s^2) + 2(R_{Lm+1} - \alpha_m^2 R_{L1})R_s + 2(X_{Lm+1} - \alpha_m^2 X_{L1})X_s = \alpha_m^2 R_{L1}^2 + X_{L1}^2 - (R_{Lm+1}^2 + X_{Lm+1}^2) \quad m = 1, 2, 3$$

对于上述方程, 可以抵消 $R_s^2 + X_s^2$, 得到两个二元一次方程进行求解。

$$a_m = 1 - \alpha_m^2 \quad b_m = 2(R_{Lm+1} - \alpha_m^2 R_{L1}) \quad d_m = 2(X_{Lm+1} - \alpha_m^2 X_{L1})$$

$$c_m = \alpha_m^2 (R_{Lm}^2 X_{Lm}^2) - (R_{Lm+1}^2 + X_{Lm+1}^2)$$

$$R_s = \frac{(a_2 c_1 - a_1 c_2)(a_3 d_2 - a_2 d_3) - (a_3 c_2 - a_2 c_3)(a_2 d_1 - a_1 d_2)}{(a_2 b_1 - a_1 b_2)(a_3 d_2 - a_2 d_3) - (a_3 b_2 - a_2 b_3)(a_2 d_1 - a_1 d_2)}$$

$$X_s = \frac{(a_2 c_1 - a_1 c_2)(a_3 b_2 - a_2 b_3) - (a_3 c_2 - a_2 c_3)(a_2 b_1 - a_1 b_2)}{(a_2 d_1 - a_1 d_2)(a_3 b_2 - a_2 b_3) - (a_3 d_2 - a_2 d_3)(a_2 b_1 - a_1 b_2)}$$

- 传统四负载只需要求解一个二元一次方程组。

排气声源识别

间接测量方法

4. 多负载法

$$\begin{bmatrix} Z_{L1} & -p_{L1} \\ Z_{L2} & -p_{L2} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{Ln} & -p_{Ln} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_s \\ Z_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{L1}Z_{L1} \\ p_{L2}Z_{L2} \\ \vdots \\ p_{Ln}Z_{Ln} \end{Bmatrix}$$

- 当n大于2时，方程的个数大于未知数的个数为超静定方程组，多个方程可以降低测量误差；
- 若管内测量时需要一个参考信号用于每个负载压力信号的时间历程从同一个特征点进行测量。

概述

□威孚力达公司简介

□排气声源识别

□基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

□结论



无锡威孚力达催化净化器有限责任公司
无锡威孚环保催化剂有限公司

基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

GT-Power中声源提取

➤ 以两负载法为例

$$p_{Li} = \frac{p_s Z_{Li}}{Z_s + Z_{Li}} \quad i = 1, 2$$

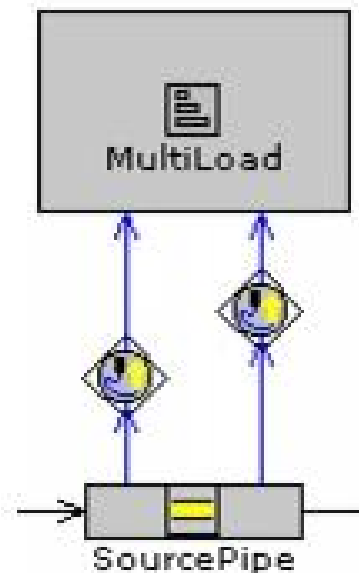


$$Z_s = \frac{p_{L1} - p_{L2}}{\frac{p_{L1}}{Z_{L1}} - \frac{p_{L2}}{Z_{L2}}}$$



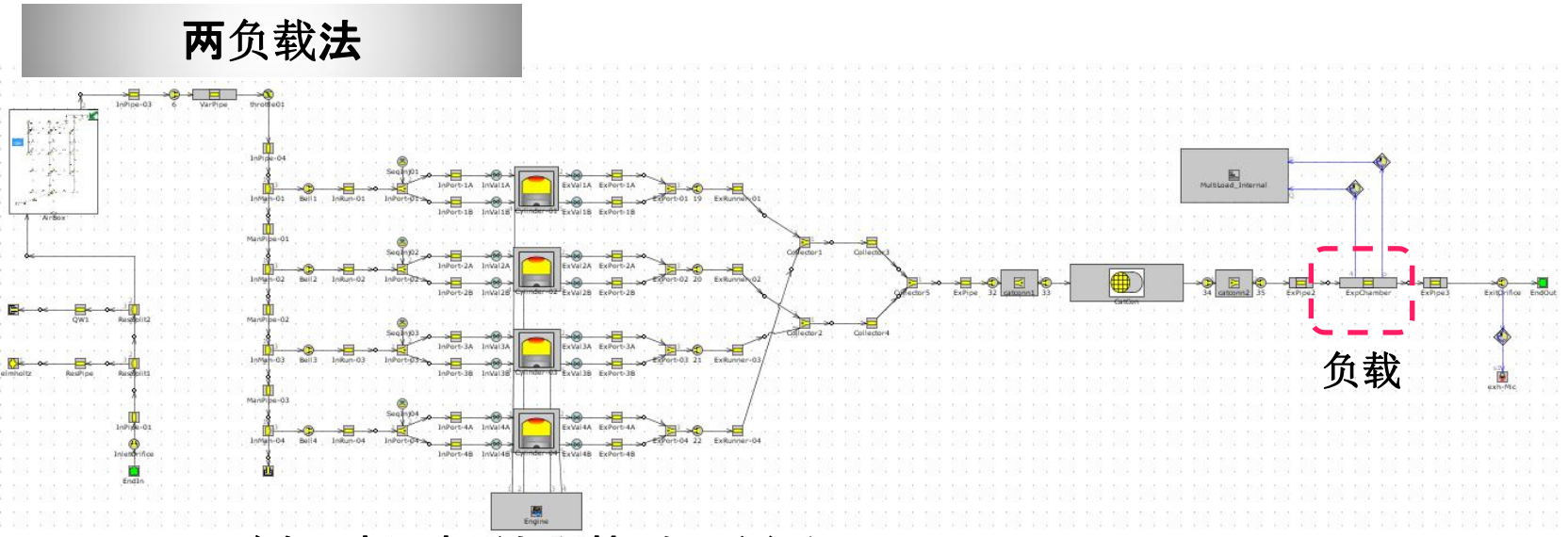
$$Z_s = \frac{p_{L1} - p_{L2}}{\frac{p_{L1}}{Z_{L1}} - \frac{p_{L2}}{Z_{L2}}} = \frac{p_{L1} - p_{L2}}{V_{L1} - V_{L2}}$$

体积速度 $V_{Li} = \frac{p_{Li}}{Z_{Li}}$



- GT-Power软件中每次仿真都能从相同条件进行计算，不需要如实验一样需要参考信号；
- 可以利用排气系统压力、体积速度传感器进行时间历程记录，通过FFT变换到频域进行计算。

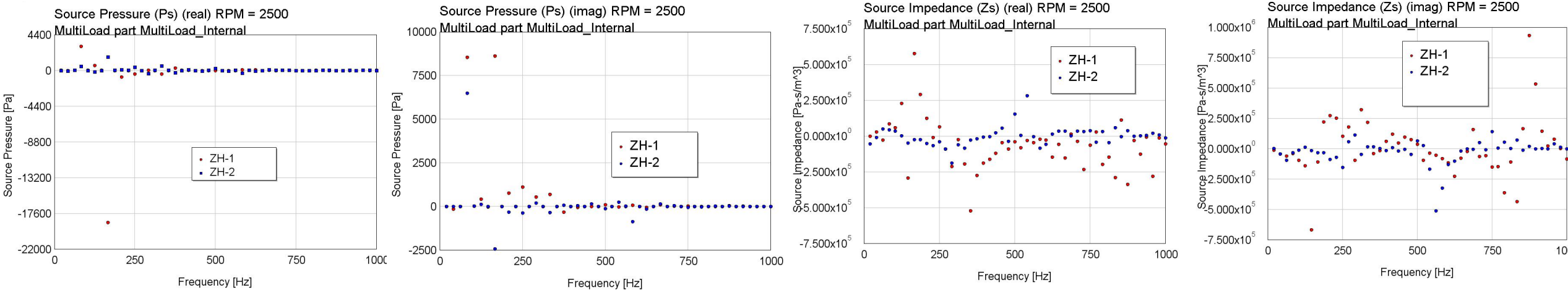
基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测



组合名称	组合特征
组合1	两个直径一样，不等长的直管
组合2	两个直径不同，长度不同的直管

- 负载的不同组合，导致不同的计算结果；
- 理论上声源声压与负载应该唯一；
- 声阻在部分频率下出现了负值，不符合实际的物理意义。

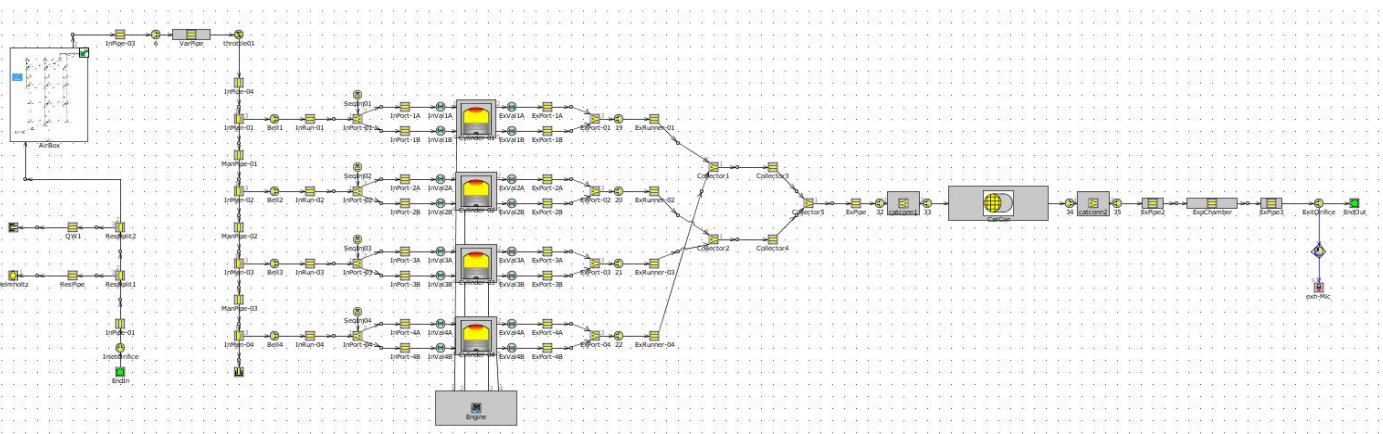
➤ 以2500rpm为例，声源声压与阻抗，如下图所示



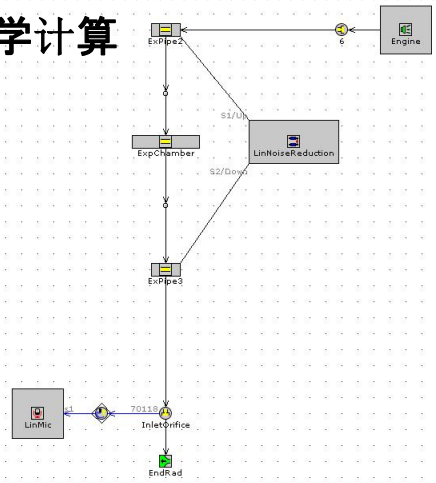
基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

两负载法

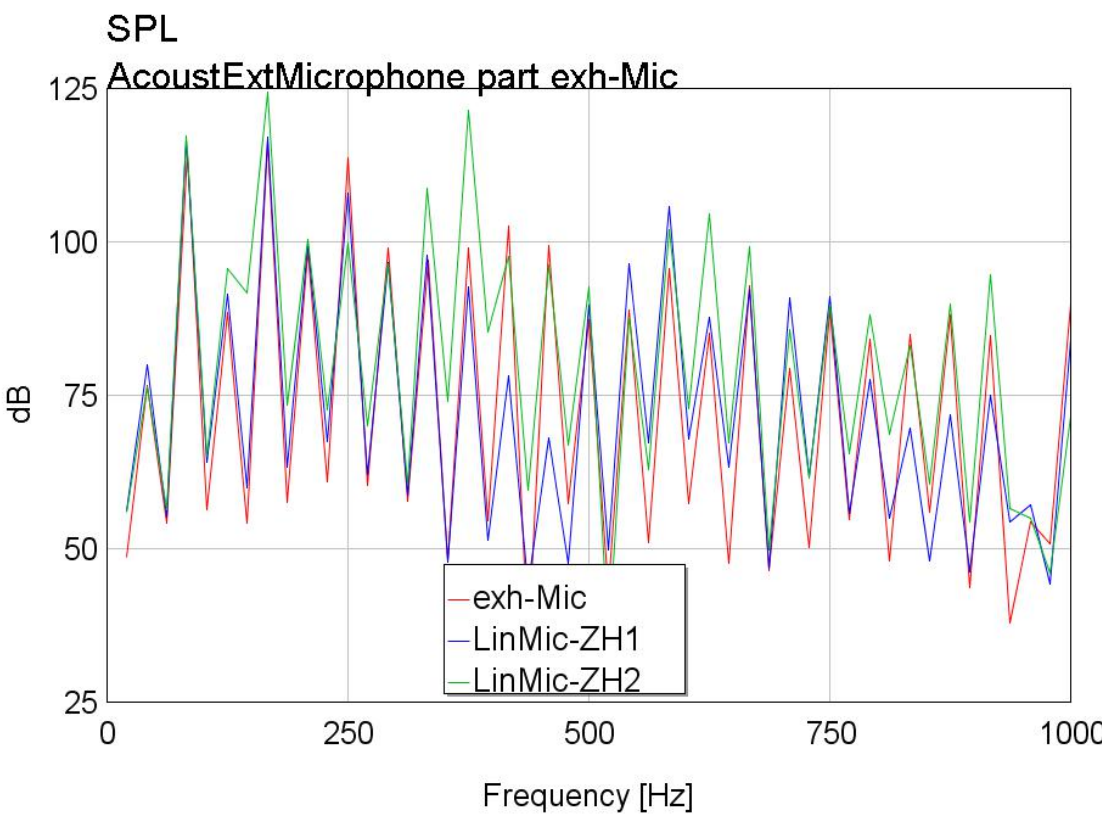
➤ 尾管噪声-非线性声学计算



➤ 尾管噪声-线性声学计算



➤ 不同方法尾管噪声(2500rpm)对比



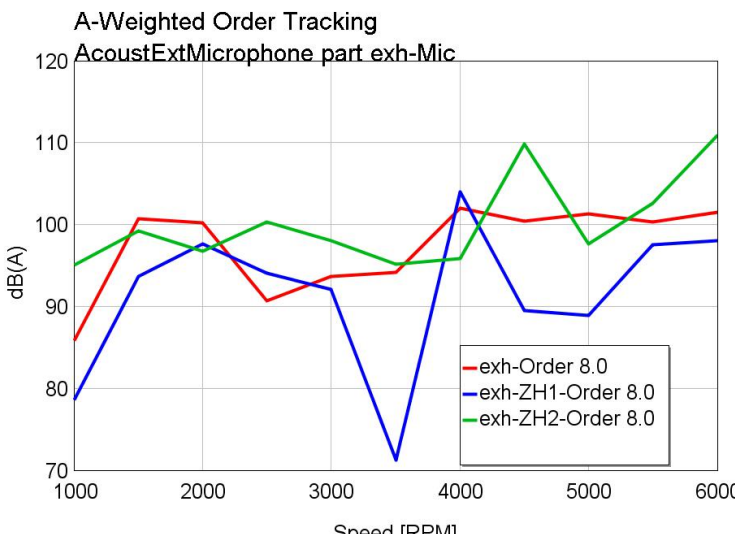
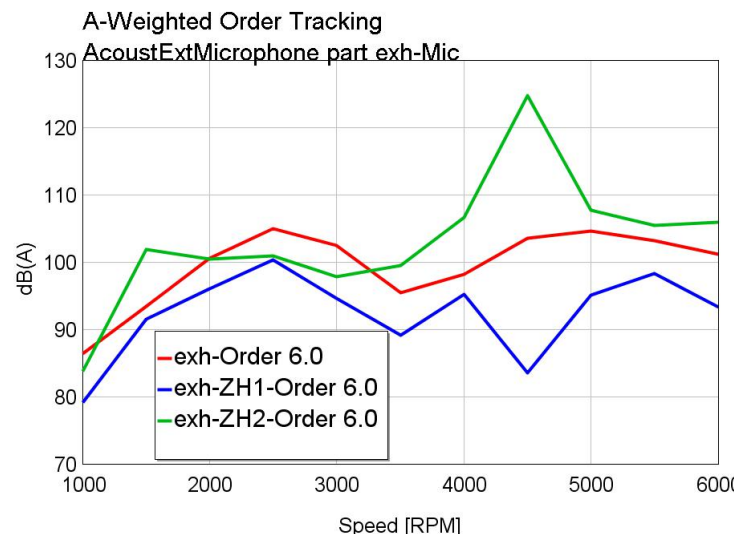
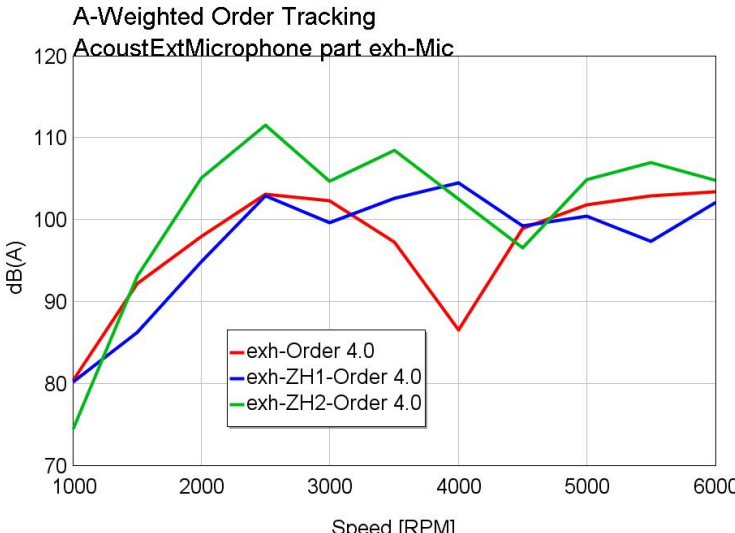
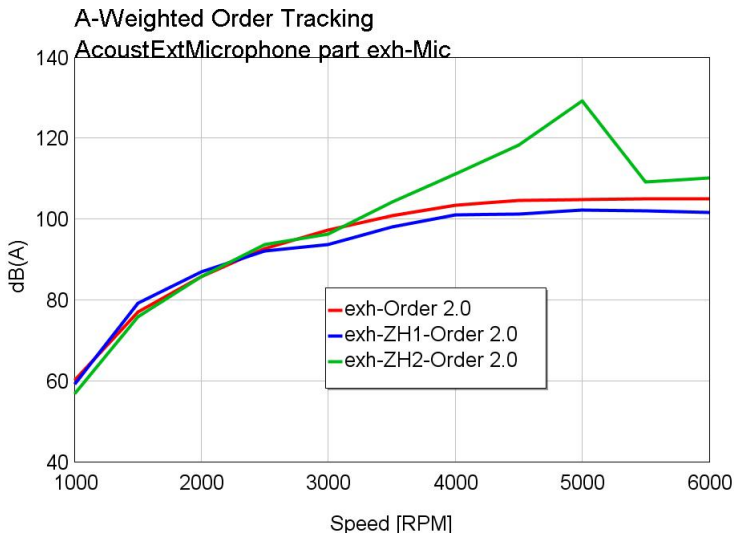
➤ 不同组合计算出来的尾管噪声，相差较大。

基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

三负载法

组合名称	组合特征
组合1	三个直径一样，不等长的直管
组合2	三个直径不同，长度不同的直管

- 负载的不同组合，计算结果不同；
- 部分转速下，线性声学理论(组合1)的结果与非线性求解结果相差较大，出现较为异常的峰值。原因为组合1中负载类型相似，阻抗在部分频率差异较小，计算会出现较大误差。

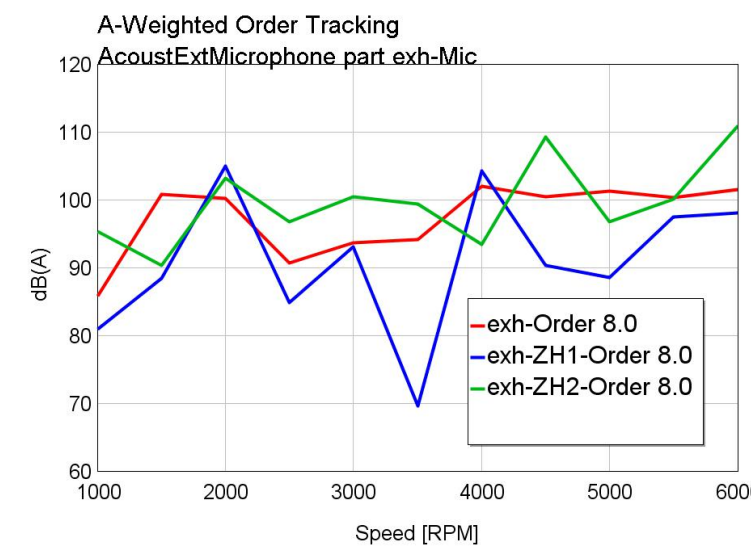
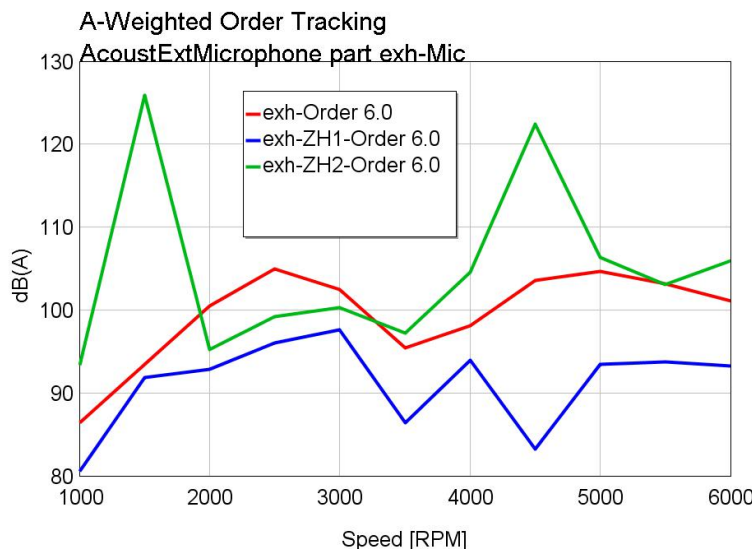
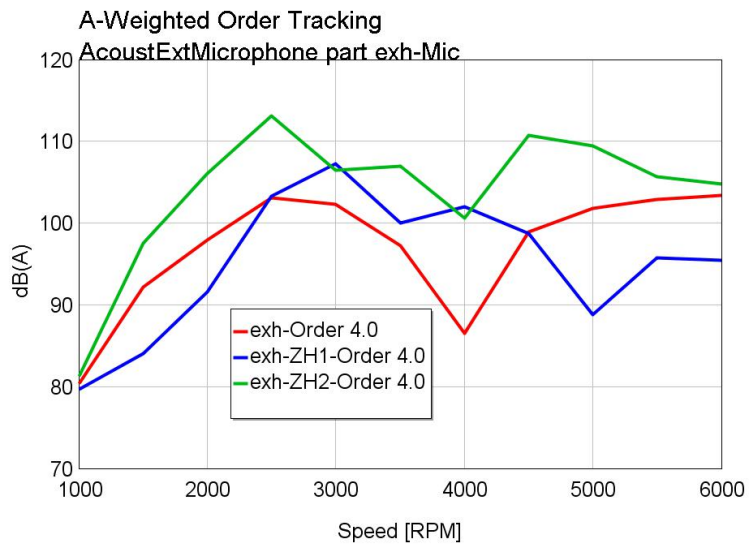
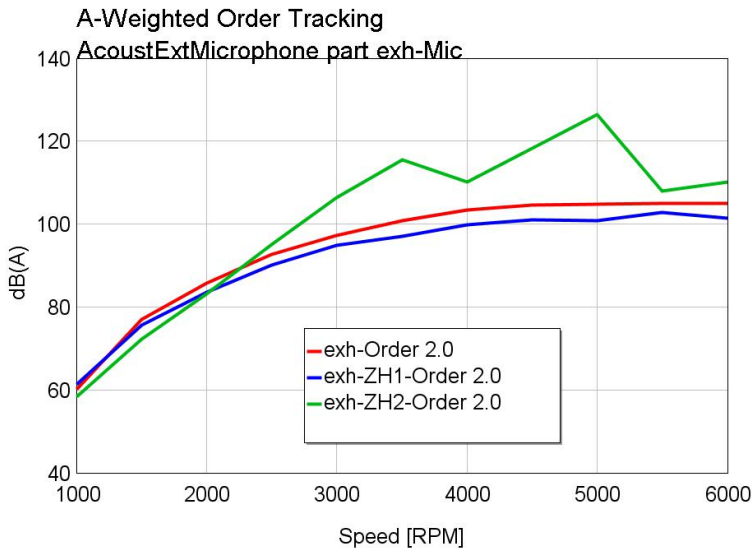


基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

四负载法

组合名称	组合特征
组合1	四个直径一样，不等长的直管
组合2	四个直径不同，长度不同的直管

- 负载的不同组合，计算结果不同；
- 部分转速下，线性声学理论(组合1)的结果与非线性求解结果相差较大，出现较为异常的峰值。原因为组合1中负载类型相似，阻抗在部分频率差异较小，计算会出现较大误差；
- (组合1)误差不会因为负载的个数增多而减小。



基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

基于多负载的最小二乘法

$$p_{Li} = \frac{p_s Z_{Li}}{Z_s + Z_{Li}} \quad p_s = (Z_s + Z_{Li})V_{Li} = p_i + V_{Li}Z_s$$

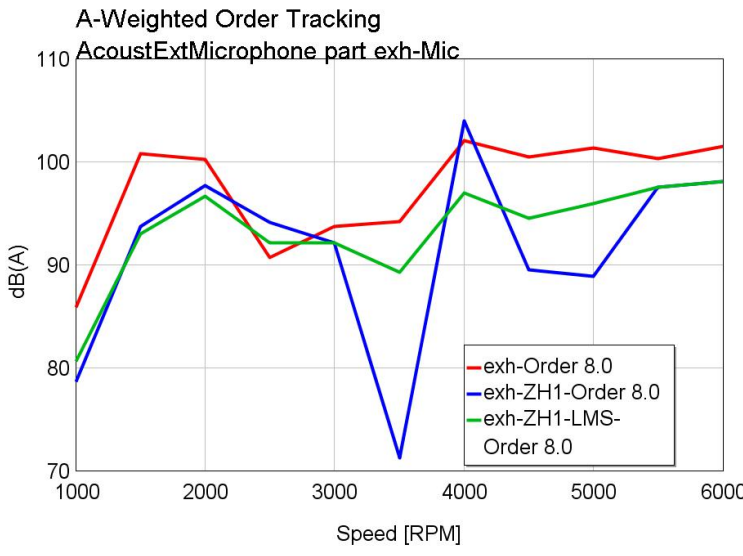
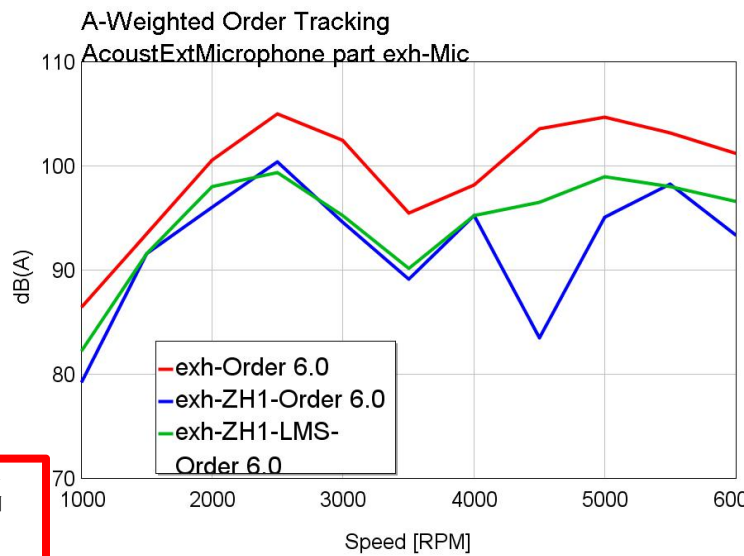
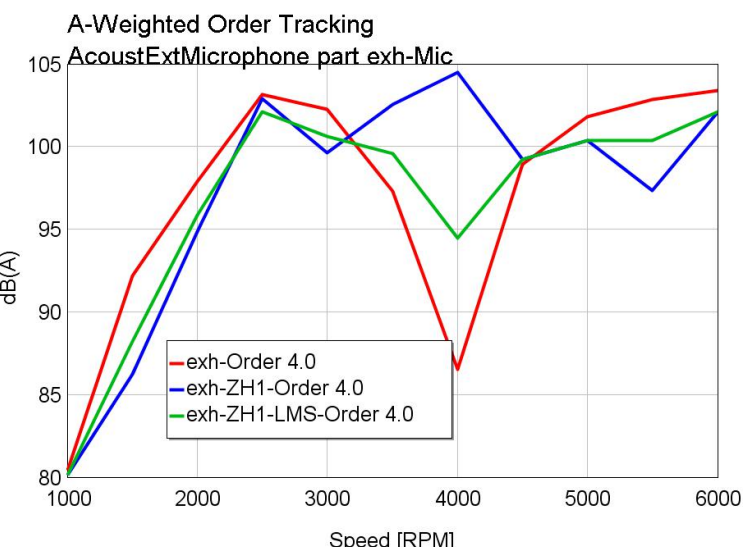
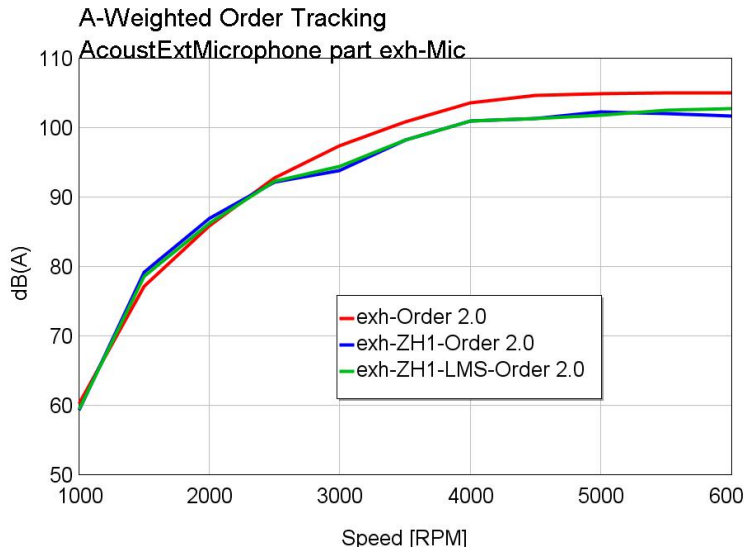
$$F = \sum_{i < j} |(p_{Li} + V_{Li}Z) - (p_{Lj} + V_{Lj}Z)|^2$$
$$= \sum_{i < j} |(p_{Li} - p_{Lj}) + (V_{Li} - V_{Lj})Z|^2$$

$F \geq 0$ 恒成立, 对于多次计算的 p 值, 使得误差函数 F 最小的 Z 应该满足:

$$\frac{\partial F}{\partial R} = \frac{\partial F}{\partial X} = 0 \quad \Rightarrow \quad Z_s = \frac{-\sum_{i < j} (p_{Li} - p_{Lj})(V_i - V_j)}{\sum_{i < j} |V_i - V_j|^2}$$

同理 $p_s = \frac{\sum_{i < j} \left(\frac{p_{Li}}{V_{Li}} - \frac{p_{Lj}}{V_{Lj}} \right) \left(\frac{1}{V_{Li}} - \frac{1}{V_{Lj}} \right)}{\sum_{i < j} \left| \frac{1}{V_{Li}} - \frac{1}{V_{Lj}} \right|^2}$

➤ 多个不同类型的负载下, Z_s 、 P_s 的分母基本规避了出现零的情况, 从而避免出现异常峰值。



概述

□威孚力达公司简介

□排气声源识别

□基于GT-Power的排气声源识别与尾管噪声预测

□结论



无锡威孚力达催化净化器有限责任公司
无锡威孚环保催化剂有限公司

结论

- 传统的噪声非线性计算求解精度较高，在排气系统开发应用中存在耗时长问题；
- 实验中进行噪声源的提取，分为直接测量与间接测量方法，间接测量相对较为容易；
- 借鉴实验的提取声源方法，基于GT-Power方法可以时域内测量，频域内求解噪声源声压及阻抗；
- 基于多负载的最小二乘法可以降低声源提取的误差。

感谢您的聆听！