



汽车气动噪声仿真解决方案

安世亚太科技股份有限公司

仿真业务部

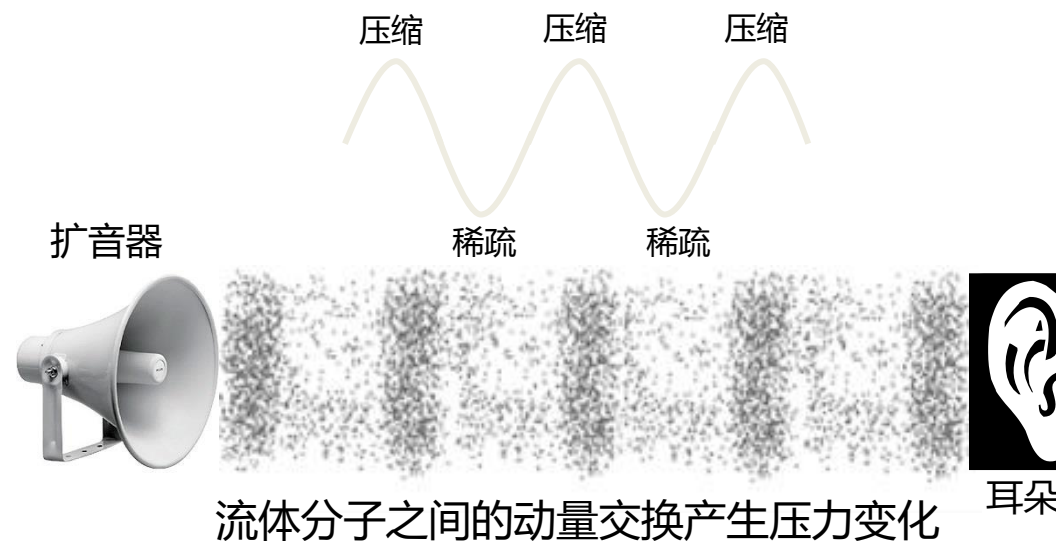
崔亮

出品 | 安世亚太
PERA GLOBAL

什么是声音？



- 声音是人耳可以听到的大气扰动
 - 声音只能在介质中传播
- 声音是由物体振动发生的，正在发声的物体叫做声源
- 声音如何在固体和流体介质中传播？
 - 在固体介质中：分子振动
 - 在流体介质中：分子动量交换

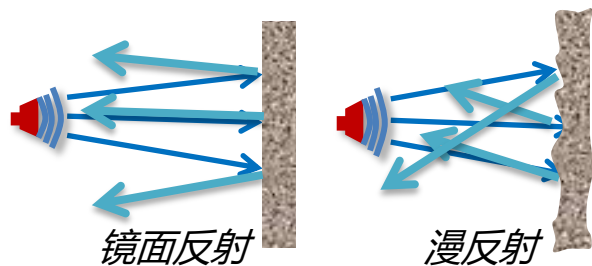


声学是对声音的研究

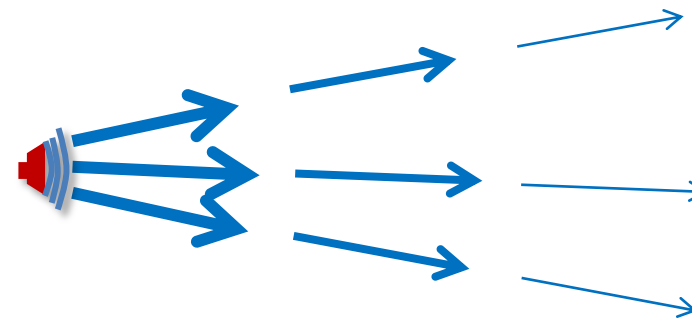
噪声是指不受欢迎的声音

- 声音作为压力波，它可以：

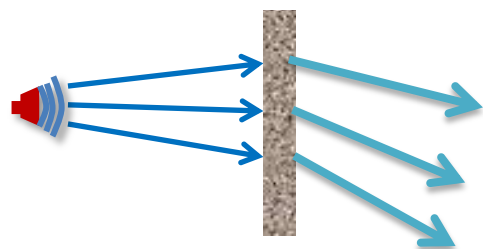
反射



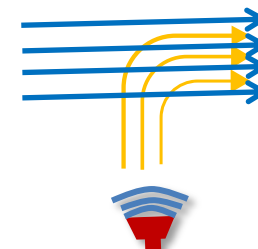
衰减



折射



运输（对流）



- 介质属性会影响声音的传播：
 - 状态方程决定传播速度（声速）
 - 介质的粘度是导致声音衰减的因素之一
 - 声音的散射、吸收效应也会导致声音衰减

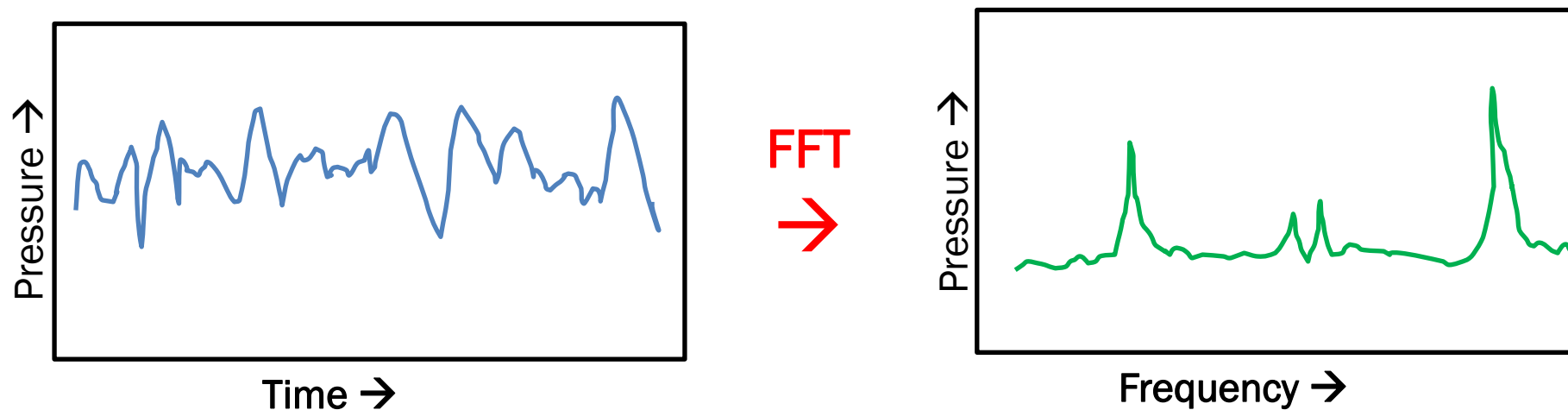
- 声压是由于声波的存在而引起的压力扰动，单位为Pa。
- 声波在空气中传播时形成压缩和稀疏交替变化，所以压力扰动是正负交替的。
- 典型的的声音信号：
 - 声音信号非常复杂



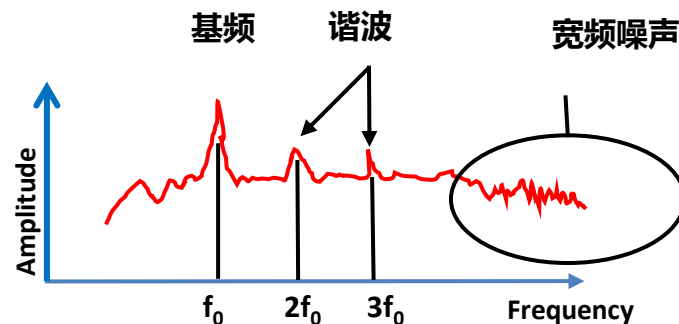
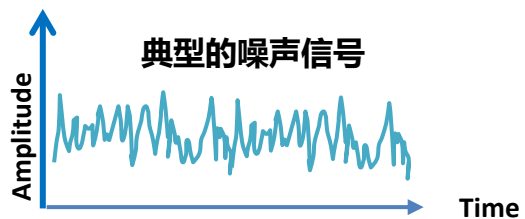
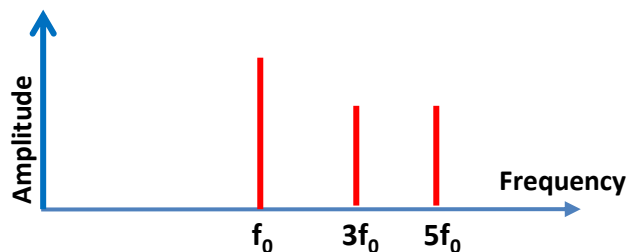
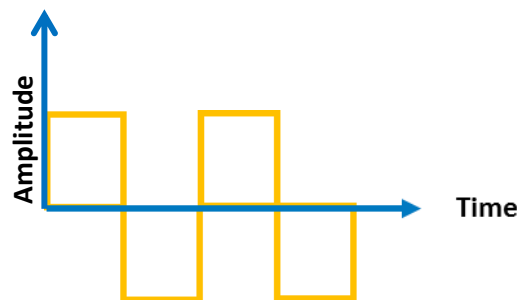
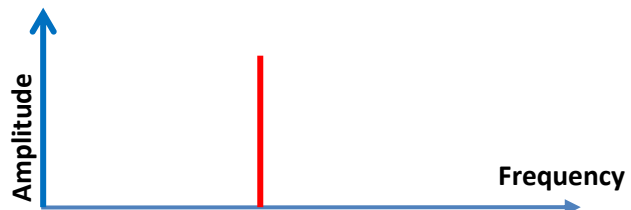
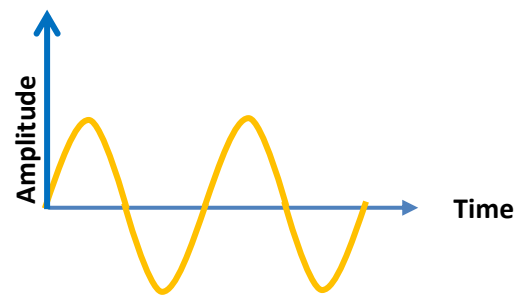
- 通常所说的声压是取均方根值进行处理，叫有效声压，因此实际上总是正值。

$$\bar{p} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T [p(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

- 将声压信号从时域变换到频域：
 - 通过傅里叶分析把信号从时域变换到频域。
 - 离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform , 缩写为DFT) , 是傅里叶变换在时域和频域上都呈离散的形式 , 将信号的时域采样变换为频域采样。
 - 在ANSYS Fluent中使用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform , 缩写为FFT) 以高效地计算DFT。



- 不同声压信号的傅里叶分析得到的噪声谱：



噪声谱可以是线谱或连续谱

噪声谱中会有一个或两个基频

谐波是基频的整数倍的频率

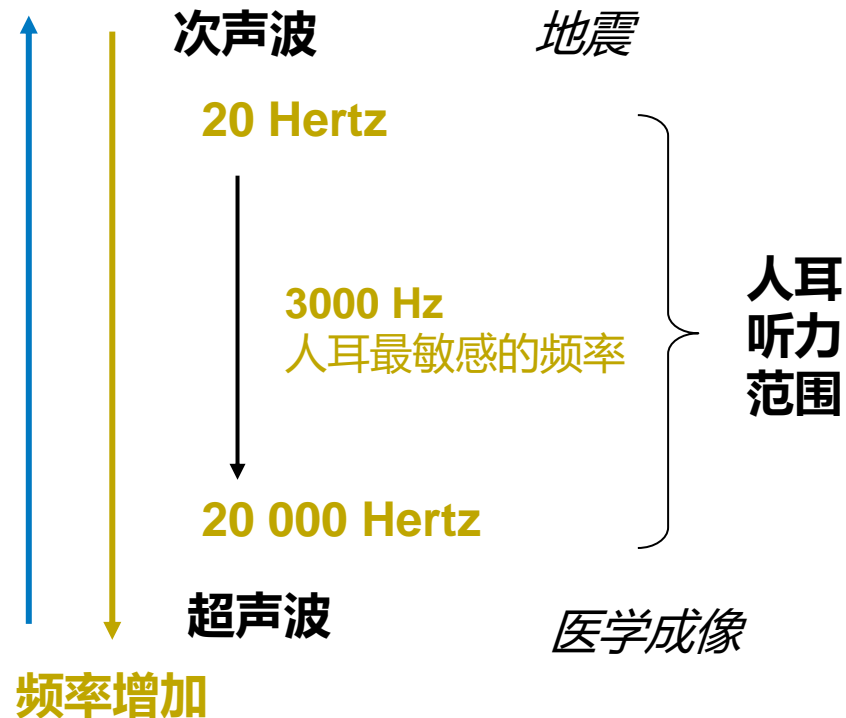
- 为什么在测量声音属性时使用分贝 (db) 级别？
- 人耳的听力范围：
 - 压力：0.00002 N/m² 到 ~20 N/m²
 - 频率：20 Hz 到 20 kHz
 - 日常生活中遇到的声音，若以声压值表示，由于变化范围非常大，可以达六个数量级以上，同时由于人的听觉对声信号强弱刺激反应不是线形的，而是成对数比例关系，所以采用分贝来表达声学量值。

$$2 * \text{Power} \rightarrow + 10 * \log 2 = + 3 \text{ dB}$$

$$10 * \text{Power} \rightarrow + 10 * \log 10 = + 10 \text{ dB}$$

$$100 * \text{Power} \rightarrow + 10 * \log 100 = + 20 \text{ dB}$$

波长增加



- 声功率级，Sound Power Level PWL，单位为dB
 - $PWL = 10 \log_{10}(P_{\text{acoustic}} / 10^{-12} \text{ W})$
 - 式中， P_{acoustic} 为声功率，指单位时间内，声波通过垂直于传播方向某指定面积的声能量，单位为W。
- 声强级，Intensity Level IL，单位为W/m²
 - $IL = 10 \log_{10}(I / 10^{-12} \text{ W/m}^2)$
 - 式中，I为声强，指单位时间内，声波通过垂直于传播方向单位面积的声能量。
- 声压级，Sound Pressure Level SPL，单位为dB
 - $SPL = 20 \log_{10}(p_{\text{rms}} / p_{\text{ref}})$
 - 式中， p_{rms} 为取均方根值处理后的有效声压； p_{ref} 在空气中为 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ，对应于人耳所能听到的1 kHz最微弱的声音。

- 一些常见声音的声压级：

SPL (dB)	常见声音
30	耳语的音量大小
40	冰箱的嗡嗡声
50	安静的办公室
60	正常交谈的声音
70	闹市区的声音
80	地铁通过时的声音
90	摩托车启动时的声音
100	装修电钻的声音
110	摇滚音乐会现场的声音
120	飞机起飞时的声音
150	燃放烟花爆竹的声音
180	火箭发射台

- 声速是声波在介质中的传播速度，也即是介质中微弱压力扰动的传播速度。
- 声速取决于声学介质的热力学性质。

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s$$

其中， ∂p 和 $\partial \rho$ 代表压强和密度的微小变化，下标S表示过程是等熵的。

- 在固体中：
$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$
其中，K为等熵体积模量。

- 在流体中，对于理想气体来说：

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

- 质量守恒方程：
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0$$

- 动量守恒方程：
$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i$$

- 将质量守恒方程对时间求导，将动量守恒方程对空间求导：

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{\partial^2(\rho U_i)}{\partial t \partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial^2(\rho U_i)}{\partial x_i \partial t} + \frac{\partial^2(\rho U_i U_j)}{\partial x_i \partial x_j} = -\frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} + \frac{\partial f_i}{\partial x_i}$$

- 变换方程以消除 $\frac{\partial^2(\rho U_i)}{\partial x_i \partial t}$ 项：

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial f_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2(\rho U_i U_j)}{\partial x_i \partial x_j}$$

- 考虑声速： $c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}$

- 可得：

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial f_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2(\rho U_i U_j)}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = -\frac{\partial f_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2(\rho U_i U_j)}{\partial x_i \partial x_j}$$

Acoustic pressure $p' = p - p_0$

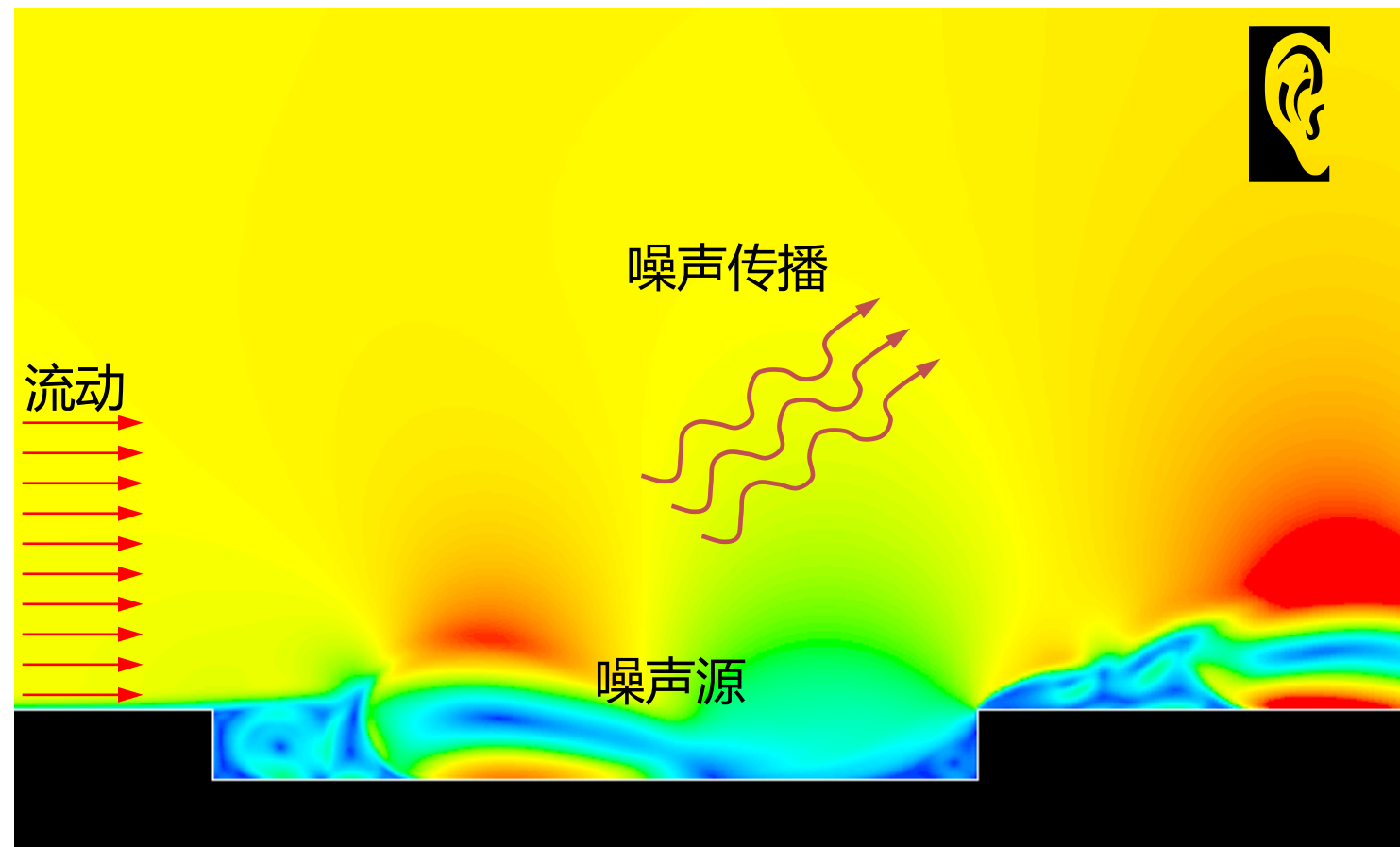
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 (p_0 + p')}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2}$$

Acoustic density $\rho' = \rho - \rho_0$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 (\rho_0 + \rho')}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} \left(= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} \right)$$

- 噪声源：由流动造成的瞬态压力脉动
 - 强度
 - 不同噪声源的贡献
 - 噪声源分类
- 声音：压力波在介质中的传播
 - 精准的输运计算/声波追踪
- 接收位置：人耳/接收器
 - 接收器感知的信号（声压）和指向性
 - 波谱（宽频、特定频率）
 - 总声压级

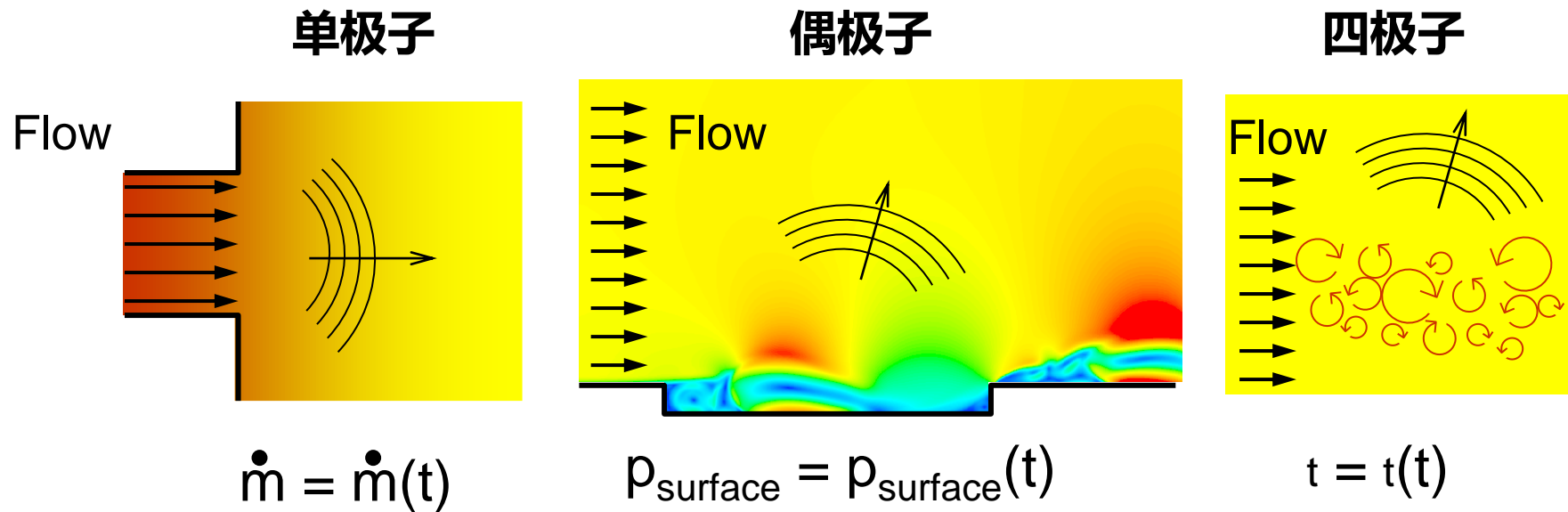
接收位置



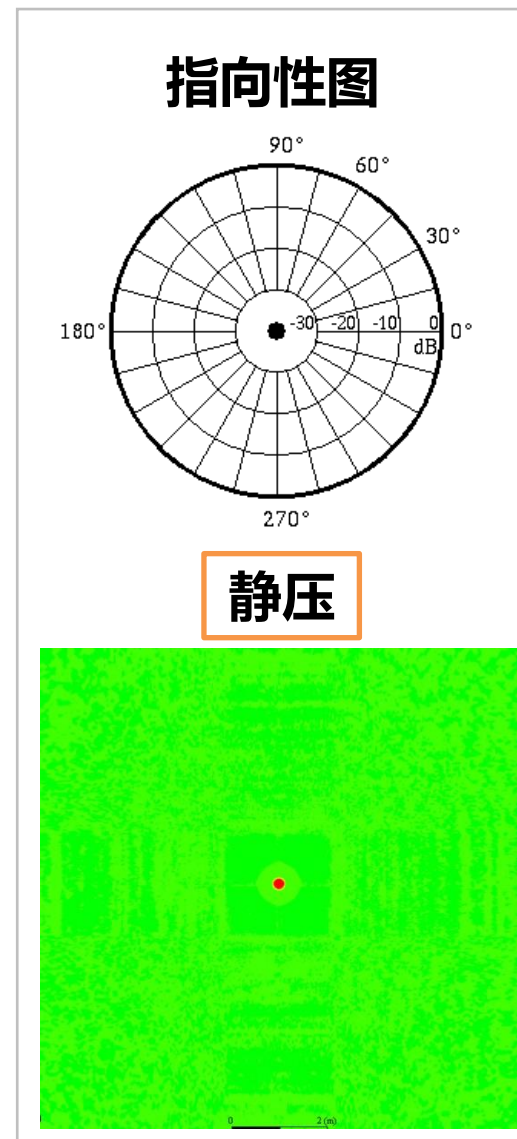
- 气动噪声问题本质上是瞬态问题
 - 计算量大
- 噪声辐射能仅占主流能量的极少部分
 - 噪声的压力脉动幅值和气动压力相比极小
 - 声压级=80 dB，声压=0.2 Pa，背景压力=101325 Pa
 - 一架波音747起飞时的噪声辐射能甚至不足以煮熟一枚鸡蛋！
 - 需要高精度的仿真计算（高精度的数值方法 + 足够细密的网格）
- 关心的频率范围很广
 - 从20 Hz到20000 Hz
 - 需要很小的瞬态计算时间步长，同时也意味着非常细密的网格尺度

- 噪声源的种类

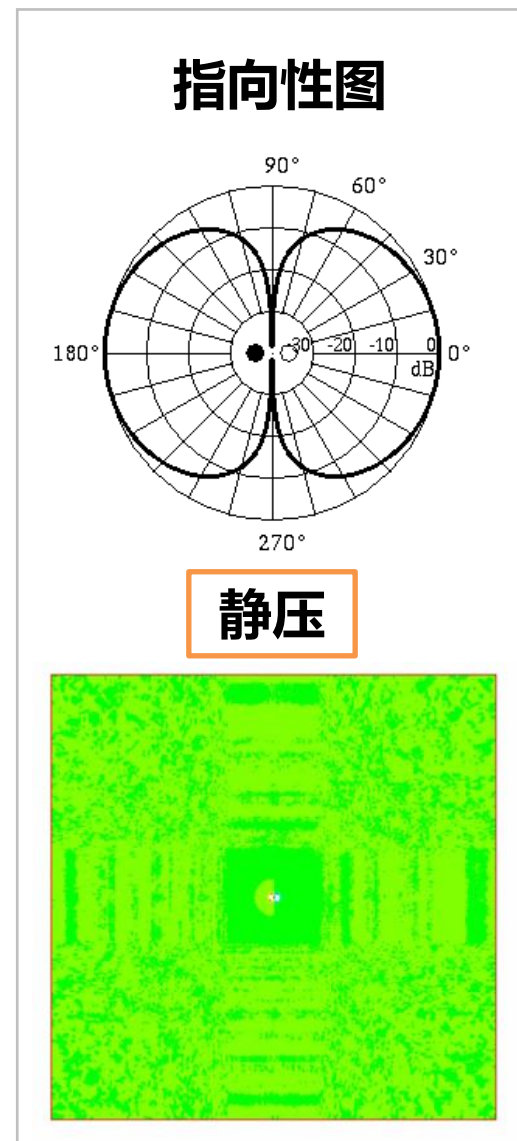
- 单极子噪声源：起因于来流的质量脉动。
- 偶极子噪声源：起因于作用在表面上的压力脉动。
- 四极子噪声源：起因于湍流的剪切应力。



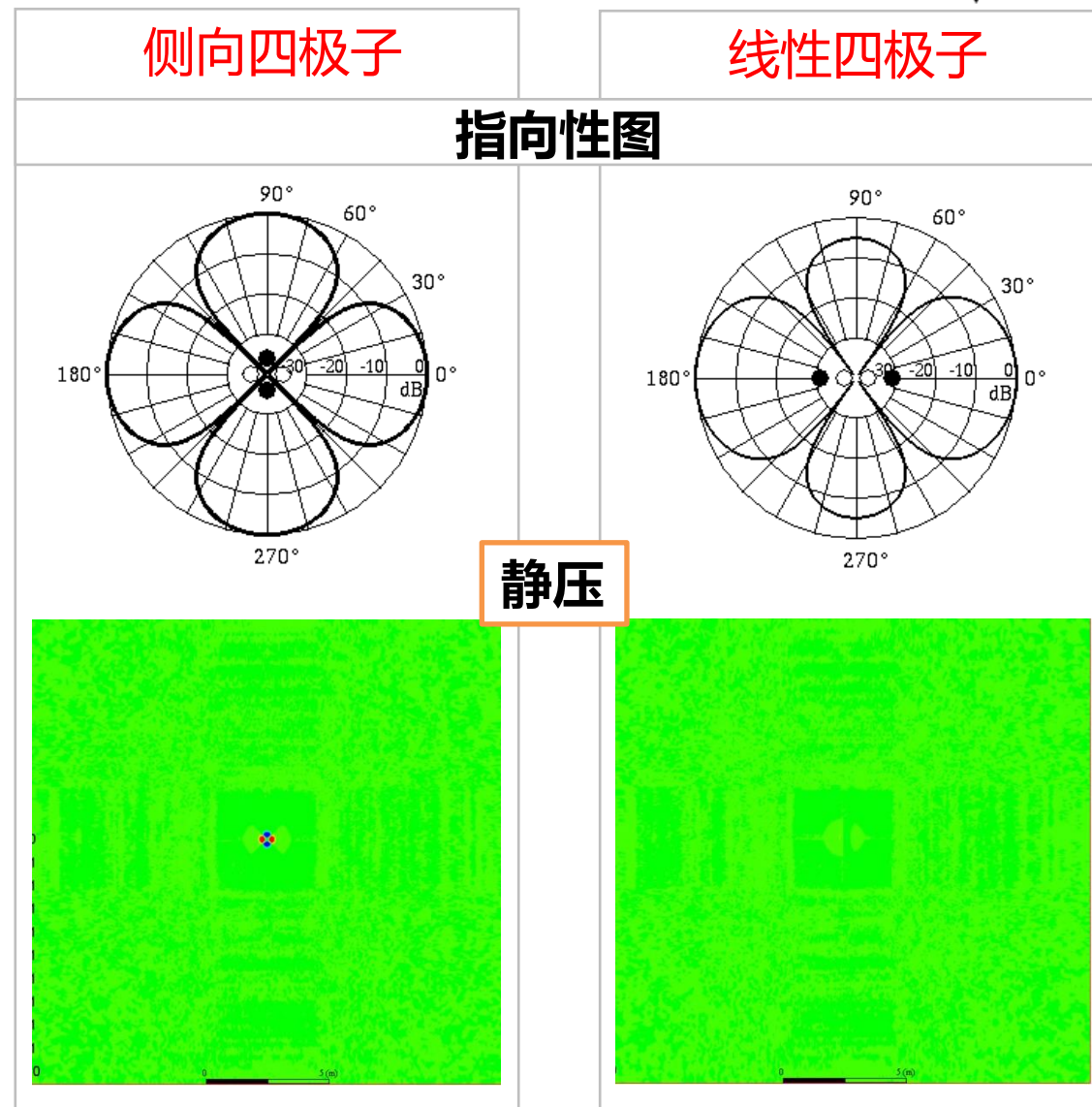
- 单极子声源也称脉动声源，是由于媒质中流入的质量或热量不均匀所形成的。
- 常见的单极子声源如：瞬态的燃烧、爆炸、汽缸运动等。
- 单极子声源产生的声波波阵面是同相位的。单极子声源的辐射没有指向特性，即单极子声源的指向性在各个方向是均匀的，指向性图是一个圆球。
- 其辐射声功率与气流速度的四次方成正比。



- 偶极子声源是当流体中有障碍物存在时，流体与物体产生的不稳定反作用力形成的。因此偶极子声源属于力声源。
- 常见的偶极子声源如：乐器上振动的弦、不平衡的转子以及机翼和风扇叶片的尾部涡流脱落等。
- 偶极子声源可看做两个相位差为 180° 的单极子声源形成的，指向性图呈“8”字型。
- 其辐射声功率与气流速度的六次方成正比。



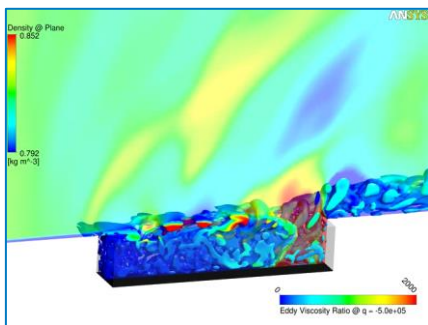
- 四极子声源是媒质中没有质量或热量的注入，也没有障碍物存在，只是由粘滞应力辐射的声波形成的。它属于应力声源。
- 亚声速湍流喷射噪声是最常见的四极子声源的例子。
- 四极子可看做是一对极性相反的偶极子组成的，指向性图呈“四叶玫瑰线性”。
- 其辐射声功率与气流速度八次方成正比。



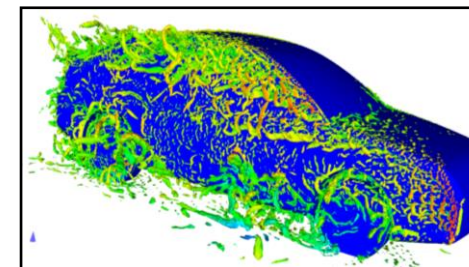
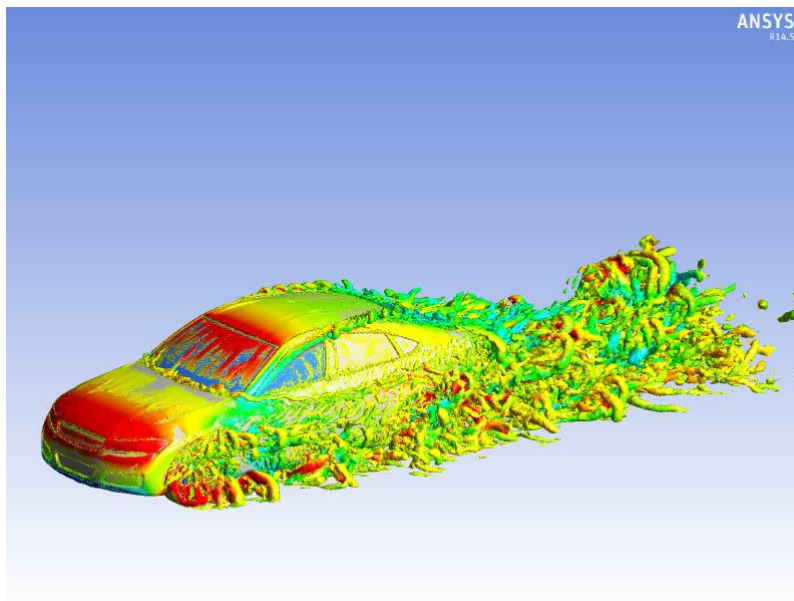
- 流场中实际存在的噪声源为以上各种噪声源的集合体，大部分是偶极子和四极子噪声源的集合体。
- 汽车气动噪声的形成原因大体上有三种：密封不良、二维分离流动以及三维分离流动。

汽车气动噪声声源分类

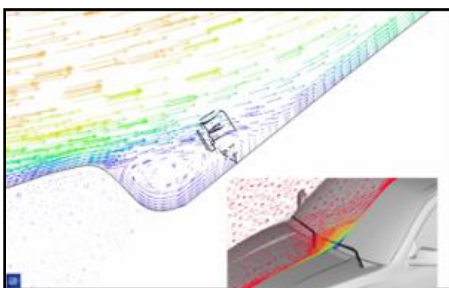
	产生原因	名称	主要位置
气动噪声 Aerodynamic Noise	密封不良	泄漏噪声 (Leak Noise)	车门、车窗的密封位置
	二维分离流动	边缘噪声 (Edge Tone)	发动机罩前缘
		风鸣噪声 (Aeolian Tone)	收音机天线 车顶行李架
		空腔共鸣噪声 (Cavity Noise)	天窗或侧窗的开启
	三维分离流动	风激流噪声 (Wind Rush Noise)	A柱与后视镜



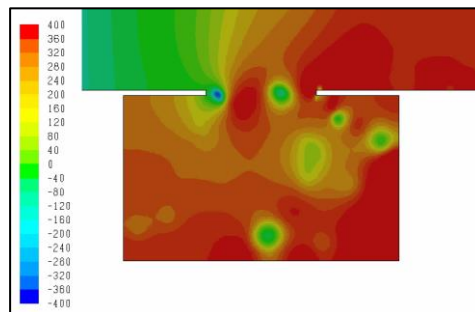
空腔共振



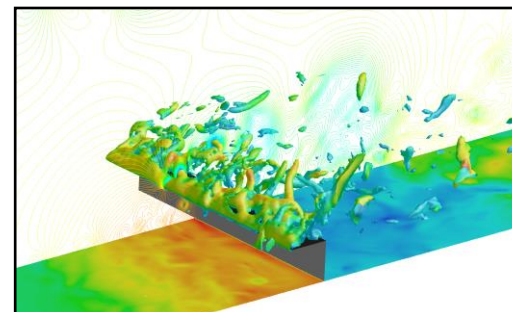
A柱涡旋



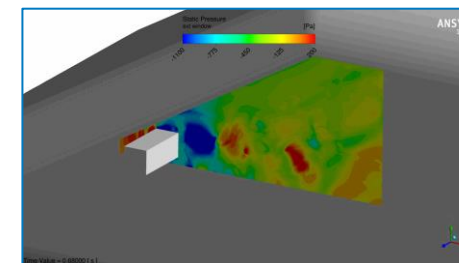
流动分离/涡旋脱落



空腔共振

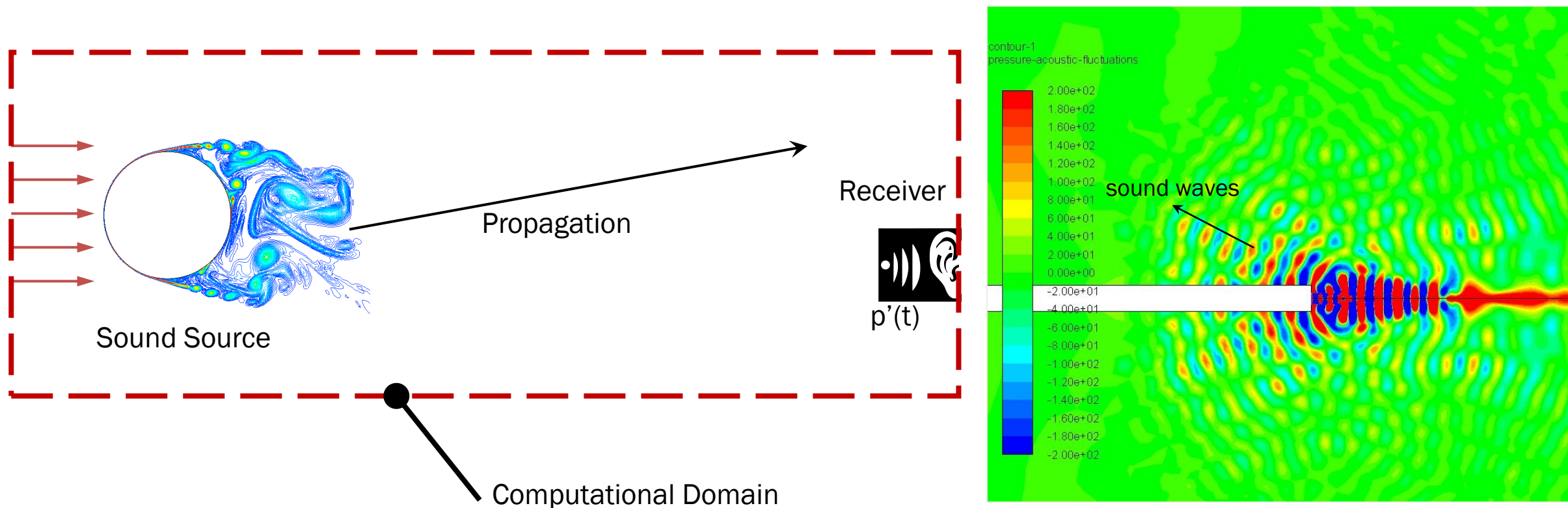


流动分离/涡旋脱落



侧后视镜涡旋

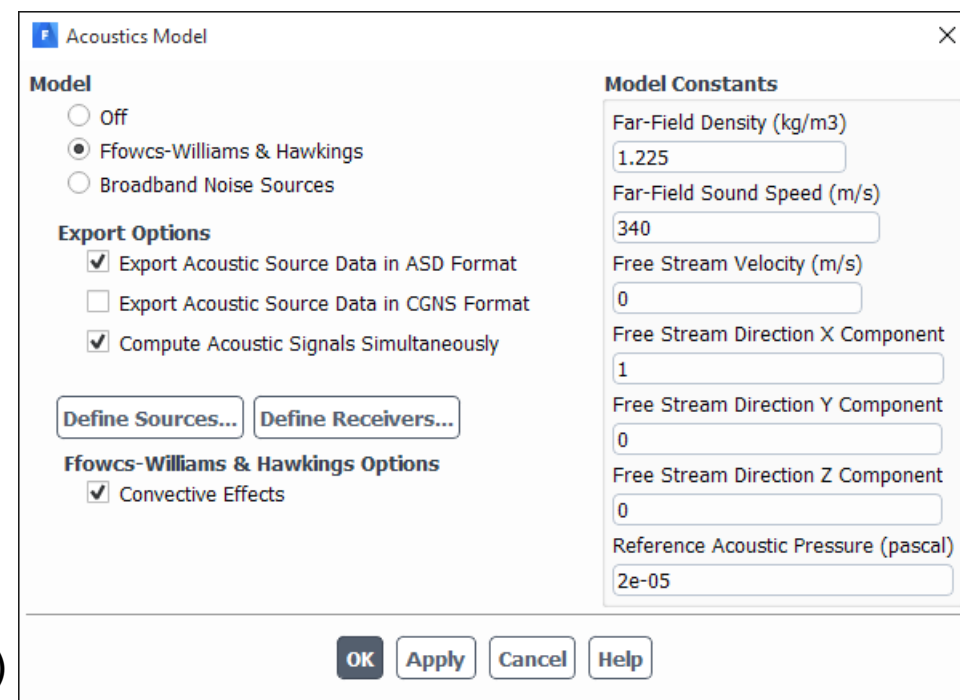
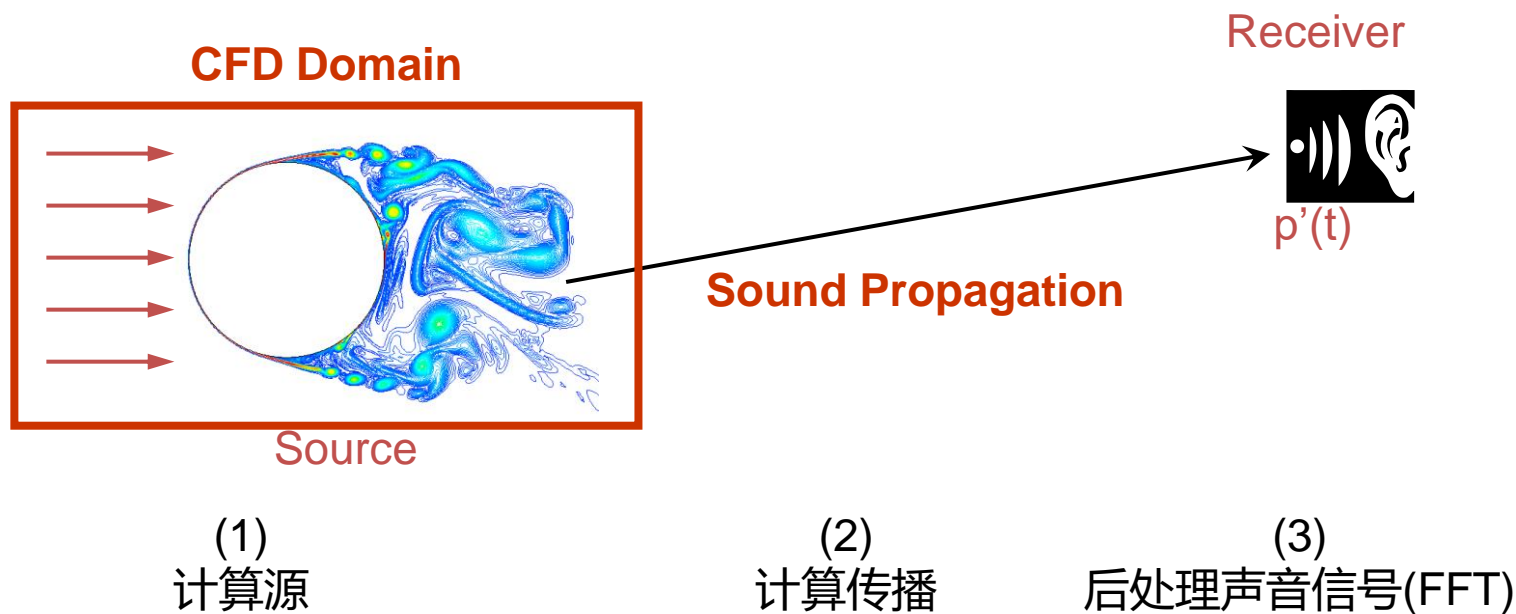
- **Computational Aeroacoustics(CAA)**
- CAA方法通过求解流体动力学方程直接得到声波的产生和传播现象。
- CAA方法需要ANSYS Fluent通过求解非稳态N-S方程（如DNS）、非稳态雷诺平均RANS方程以及在分离涡DES和大涡LES模拟中用到的滤波方程，精确模拟粘性效应和湍流效应。



静压扰动的云图

- CAA方法的优点：
 - 实现起来比较简单
 - 同时求解声音的产生和传播
 - 可以考虑流动和声音的耦合
 - 适用于声音对流动有反作用的场合
- CAA方法的缺点
 - 瞬态计算需要使用很小的时间步长，计算很长的物理时间
 - 非常细密的网格，网格数量十分庞大
 - 多用于近场噪声计算，远场噪声计算需要较大的计算域，计算量陡增
 - 由于声压级远小于流体的压力，需要使用高精度的离散格式

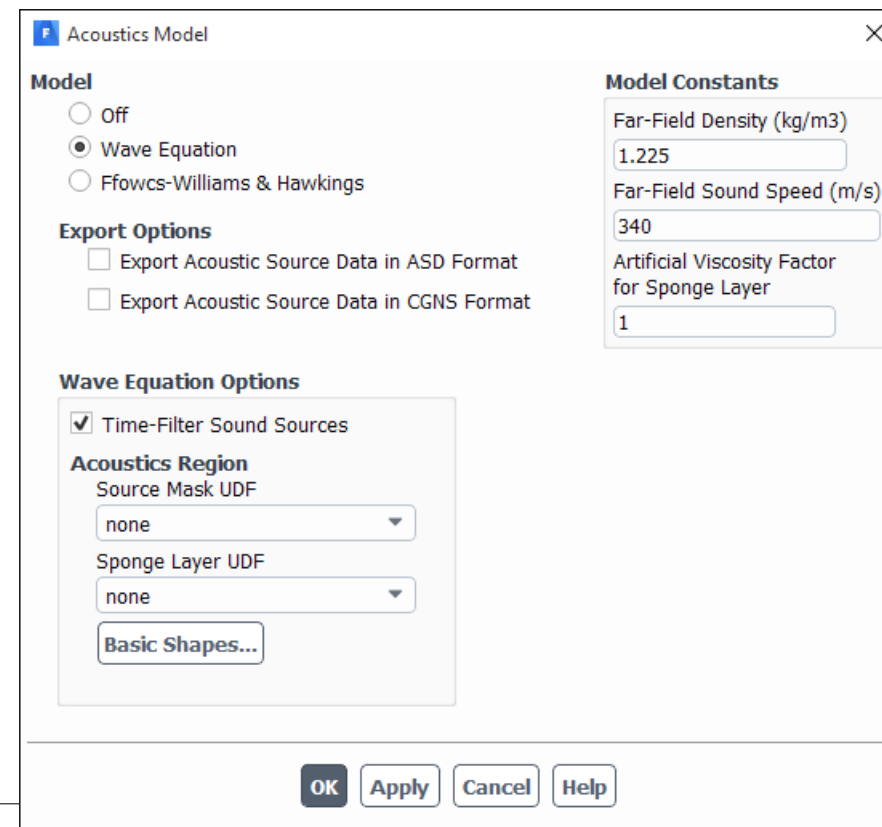
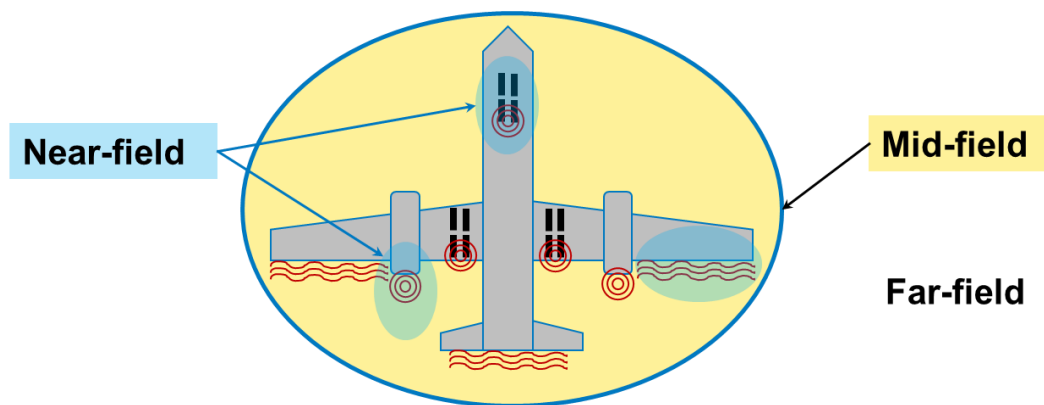
- Segregated Source-Propagation Methods (SSPM)
- 对于中场到远场的噪声模拟，ANSYS Fluent采用基于Lighthill的“噪声比拟”方法。“噪声比拟”方法不同于CAA方法，它把波动方程和流动方程解耦，在近场流动解析采用适当的控制方程比如非定常雷诺平均、DES分离涡或LES大涡模拟等方法，然后再把求解结果作为噪声源，通过求解波动方程得到解析解，这样就把流动求解过程从声学分析中分离出来。
- ANSYS Fluent中提供了基于Ffowcs Williams和Hawkings (FW-H) 方程的噪声比拟方法。



- FW-H方法的优点：
 - 计算代价较小
 - 计算域只覆盖噪声源的区域
 - 适用于远场计算
- FW-H方法的缺点
 - 无法考虑声音对流动的反作用
 - 无法考虑反射
 - 从源到接收位置之间需要有直的视线（无遮挡）

- **Acoustics Wave Equation Model (AWEM)**

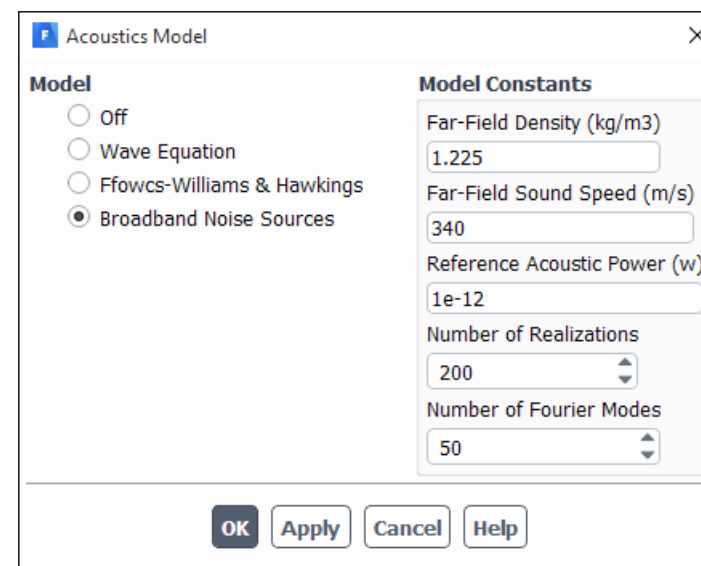
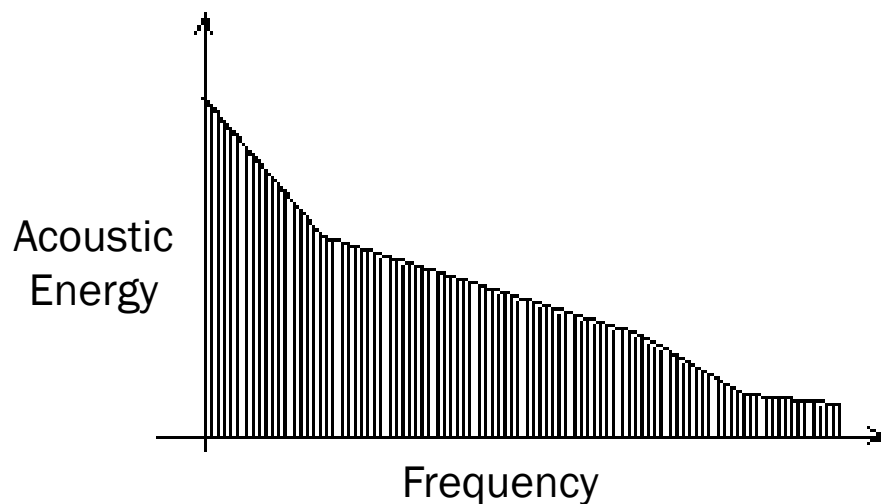
- 对于考虑反射和非均匀流场条件的中场声传播问题，ANSYS Fluent提供了新的声学波动方程求解器。
- 该求解器仅适用于模拟低马赫数流动的气动声学问题，使用不可压缩流动模型用于噪声源的计算，使用波动方程计算声音的传播。ANSYS Fluent所使用的声学波动方程是在定常密度的假设下，由Ewert和Schroeder的声学扰动方程得出的。



- 波动方程求解器的优点：
 - 仿真流程简单易于实现，无需在不同软件/不同模块之间进行任何数据交换
 - 使用同一套网格实现流动和噪声传播的瞬态耦合仿真
 - 相比于FW-H方法，适用性更好，能考虑声音在非均匀流场中的传播和反射
- 波动方程求解器的缺点
 - 仅适用于模拟低马赫数流动的气动声学问题

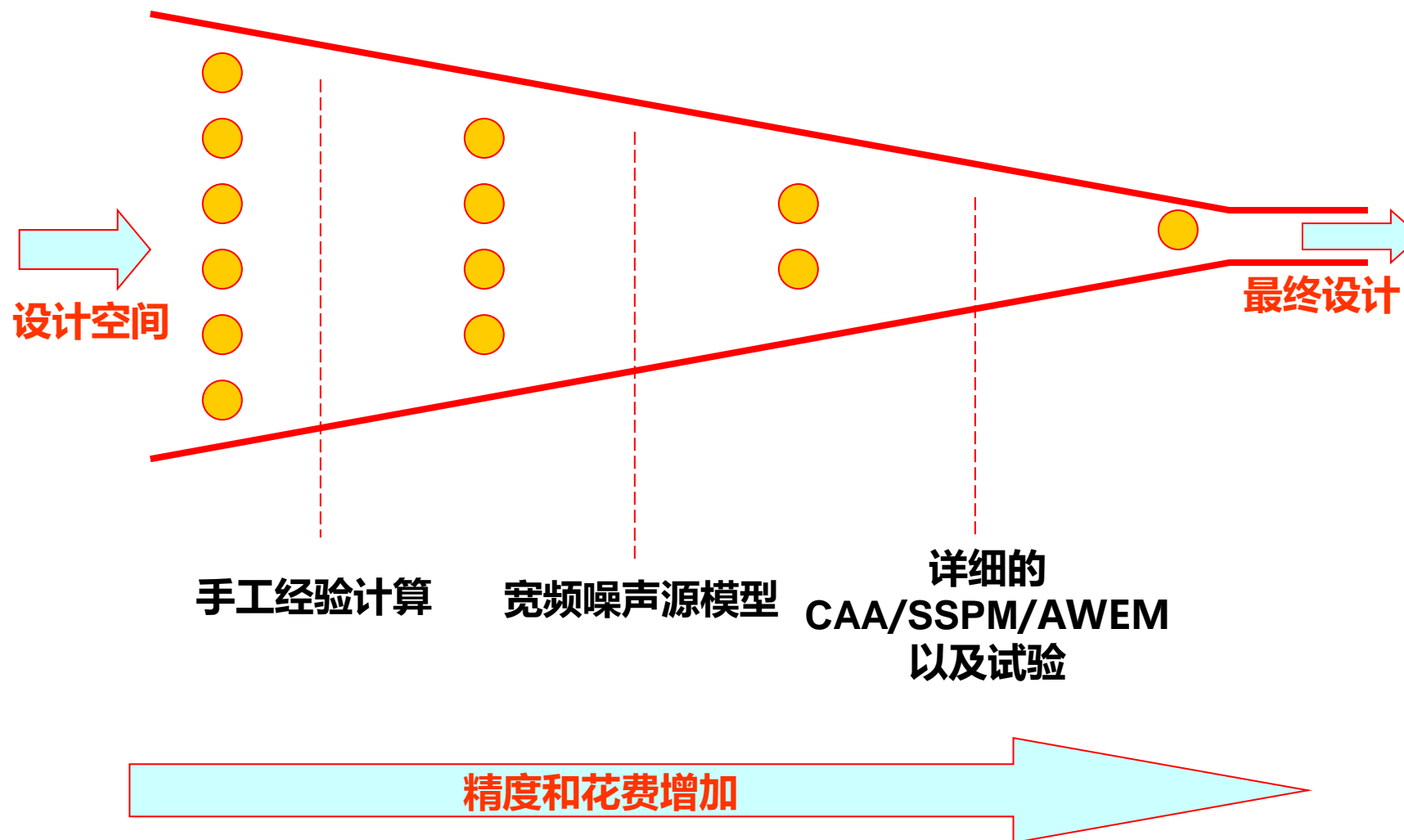
• Broadband Noise Source Models

- 在ANSYS Fluent的宽频噪声源模型中，湍流参数通过RANS方程求出，再用一定的半经验修正模型（如Proudman方程模型、边界层噪声源模型、线性Euler方程源项模型、Lilley方程源项模型）计算表面单元或体积单元的噪声功率。
- Broadband模型是其它方法的很好补充，可以采用宽频噪声源模型提取有用的诊断信息来快速确定流动中的哪一部分对噪声影响最大。然而，这些源项模型不能预测接收位置的准确噪声量级。
- Broadband模型不需要瞬态流动解，所有的源项模型只需要典型的RANS方程解，比如实际速度场、湍动能和湍流耗散率。因此宽频噪声源模型需要最小的计算代价。

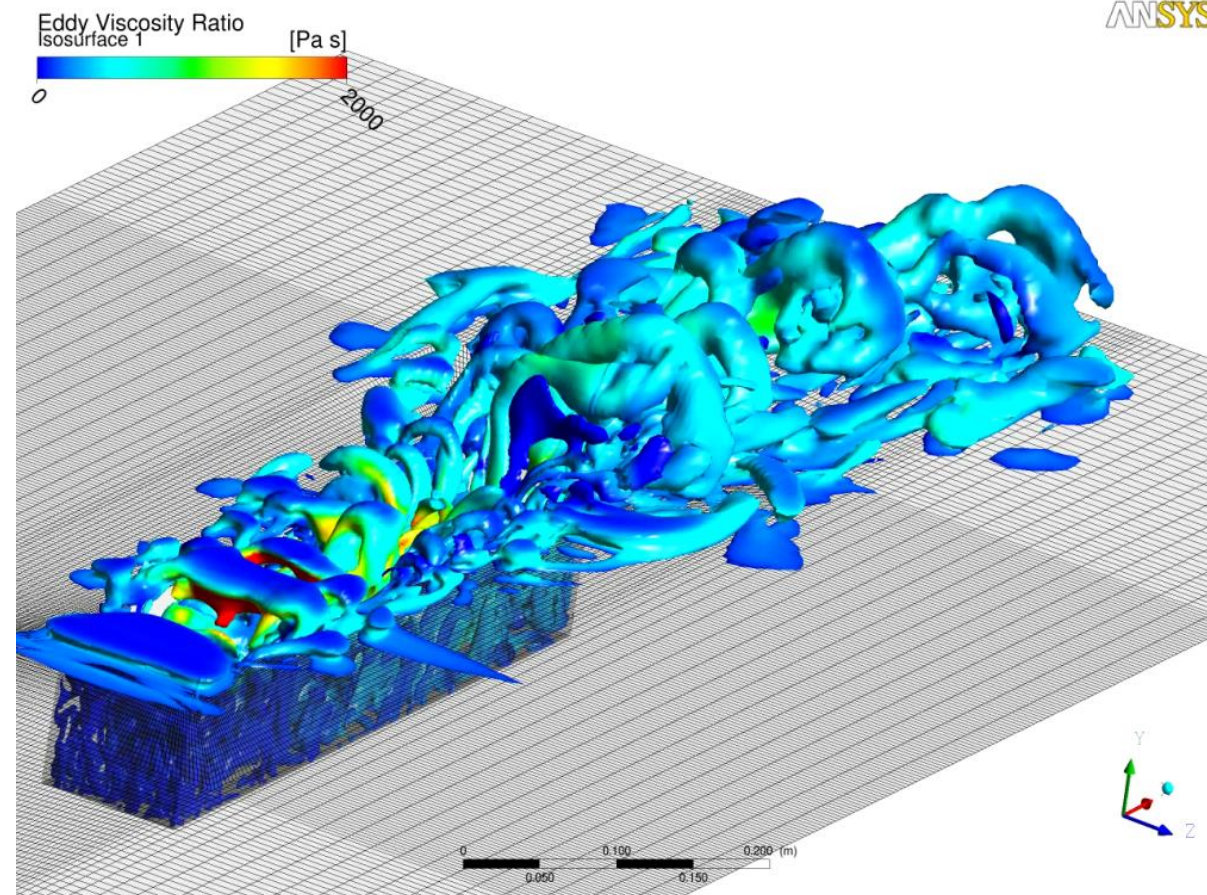


- 宽频噪声源模型的优点：
 - 计算代价最小
 - 稳态的RANS方法
- 宽频噪声源模型的缺点
 - 计算精度低
 - 无法计算出准确的噪声量级

- 各种气动噪声模拟方法在不同设计阶段的应用

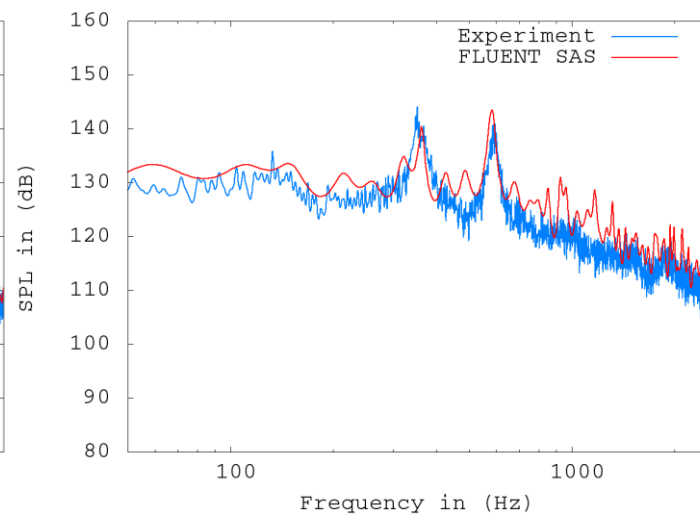
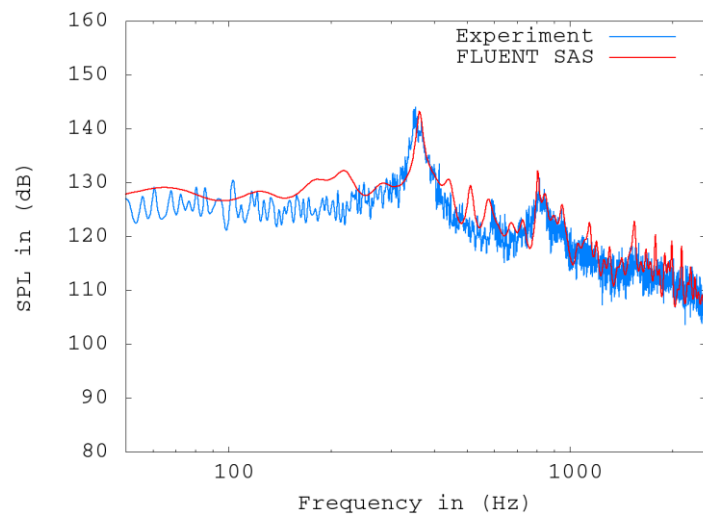
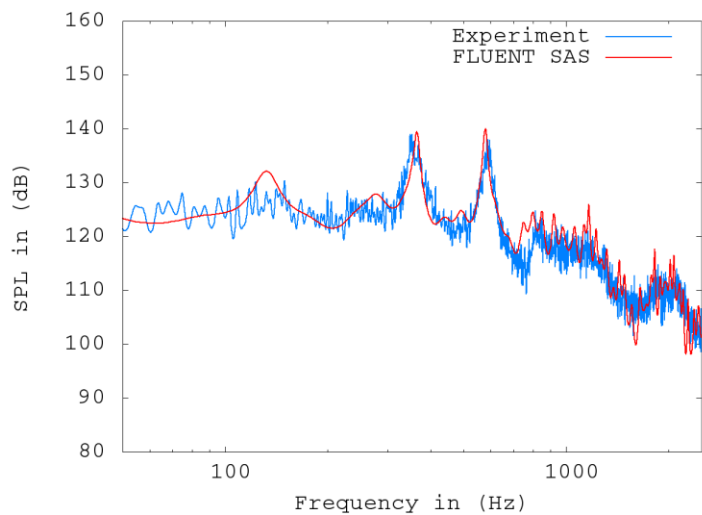
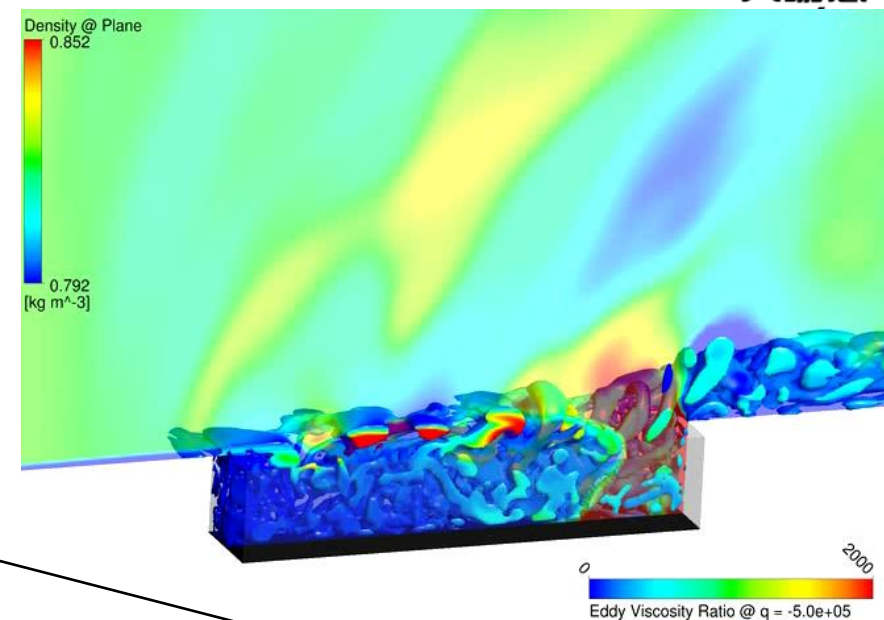
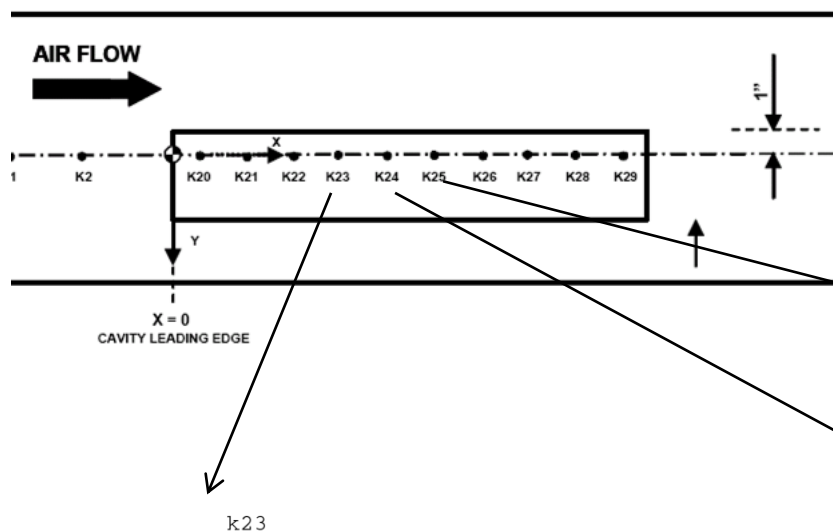


- 空腔噪声：
- Cavity size: $L \times W \times D = 5 \times 1 \times 1$ m
- Mach number 0.85
- Static pressure 62100 Pa
- Static temperature 266.53 K
- Reynolds number = $1.35e7$
- Turbulence model: DES
- Time step size $2e-5$ s
- Grid: 6.6 million hexahedral cells

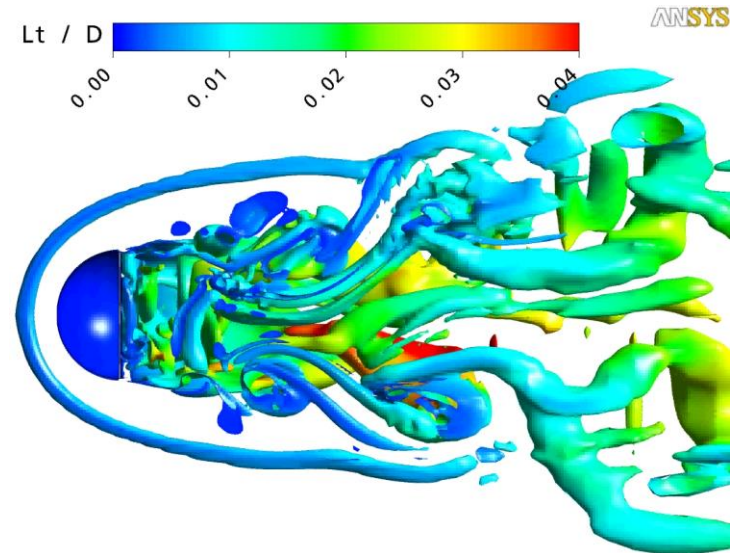


Isosurface of Q criterion

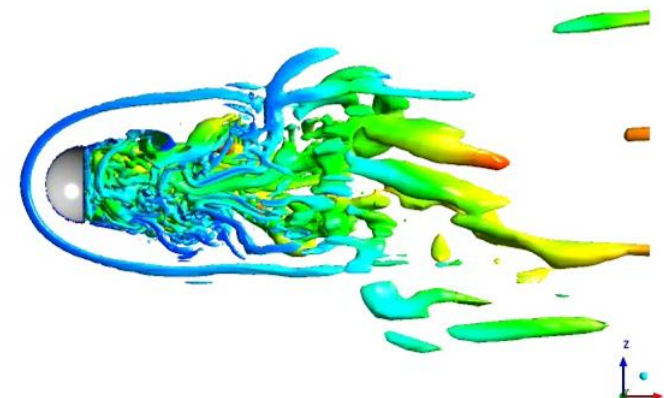
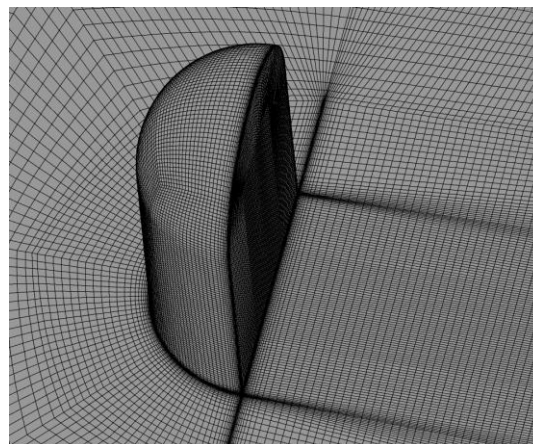
- 空腔噪声：



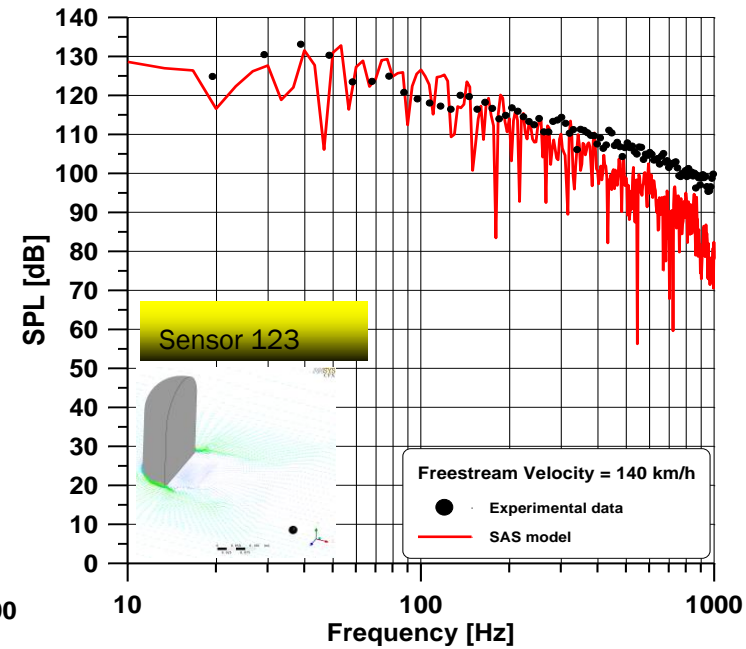
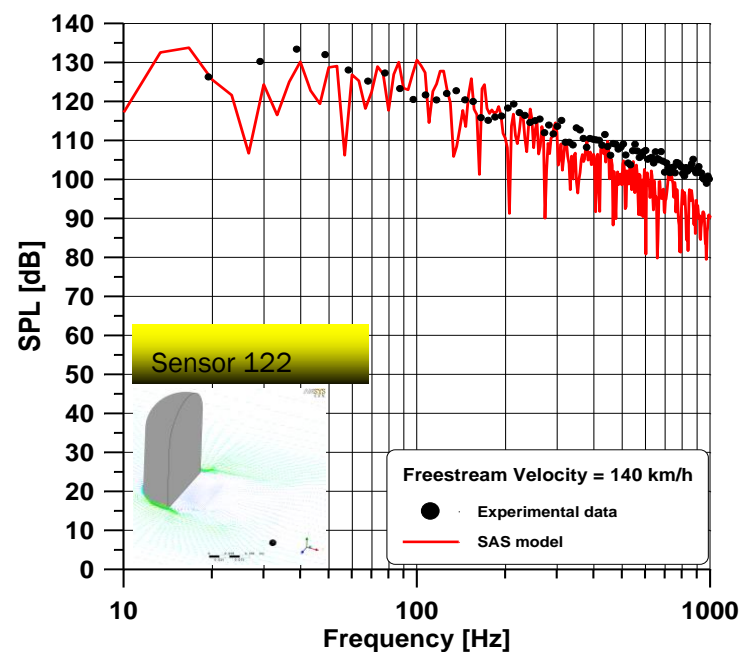
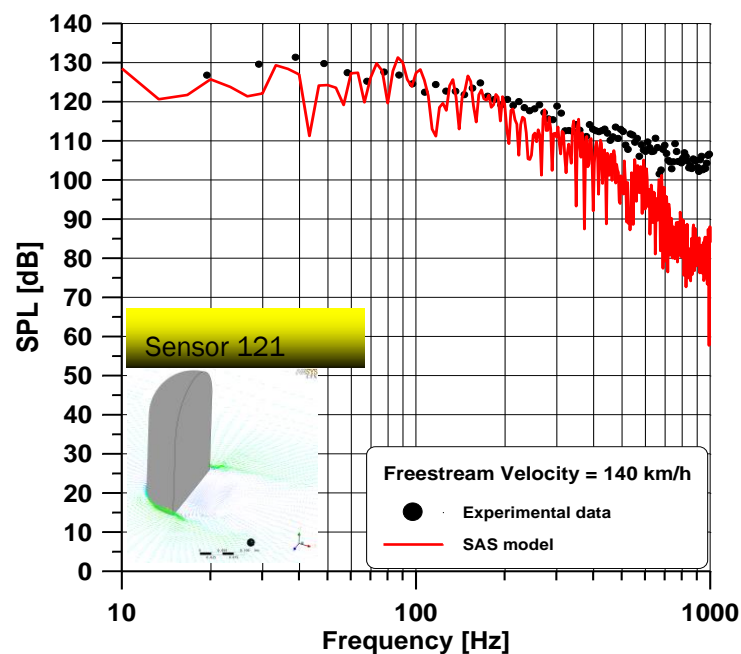
- 侧后视镜噪声：
- Plate size: $L \times W = 2.4 \times 1.6$ m
- Cylinder Diameter : $D = 0.2$ m
- Free stream Velocity: 140 km/h
- Reynolds number $Re_D = 520\,000$
- Turbulence model : SAS
- Time step size: $2e-5$ s
- Grid: 3 million nodes



- 侧后视镜噪声：

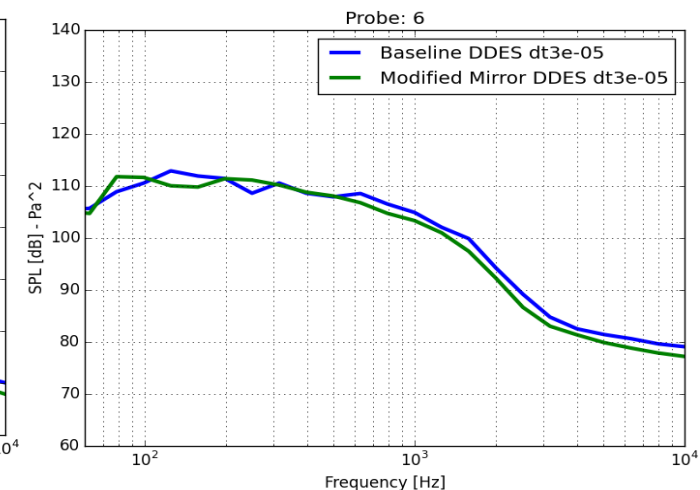
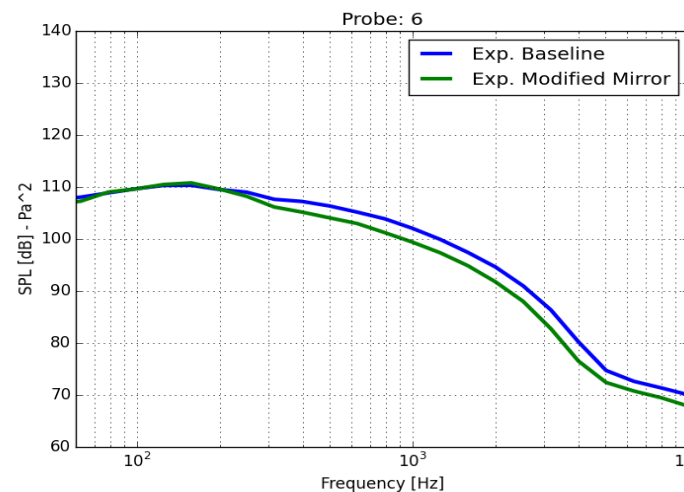
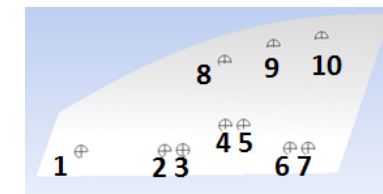
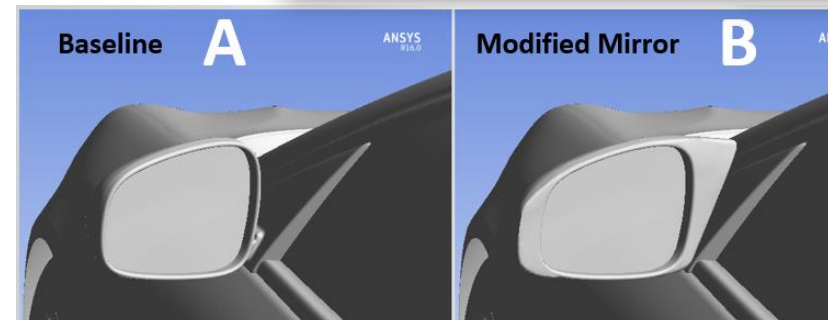
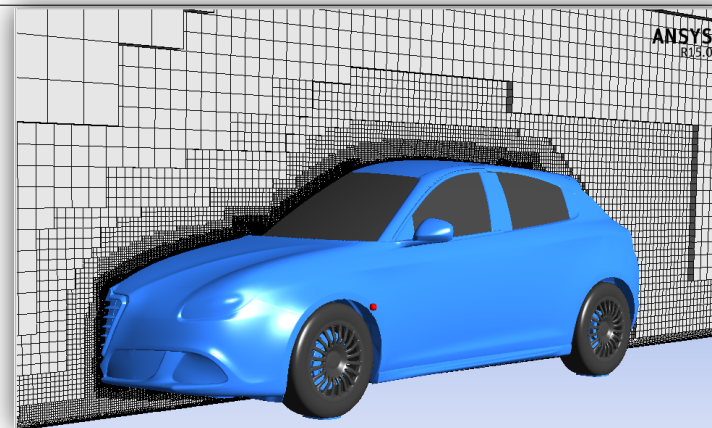
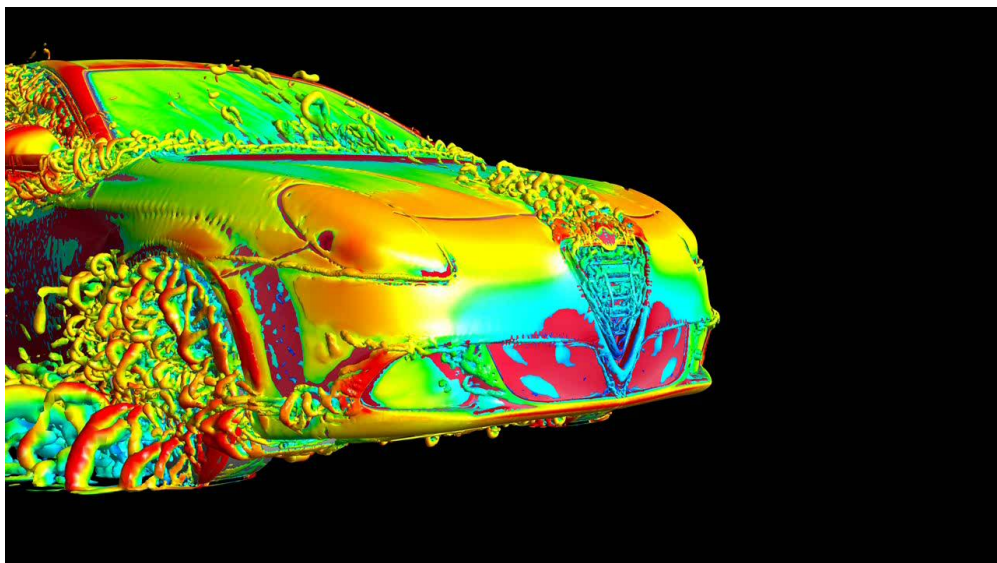


Sensors downstream the mirror

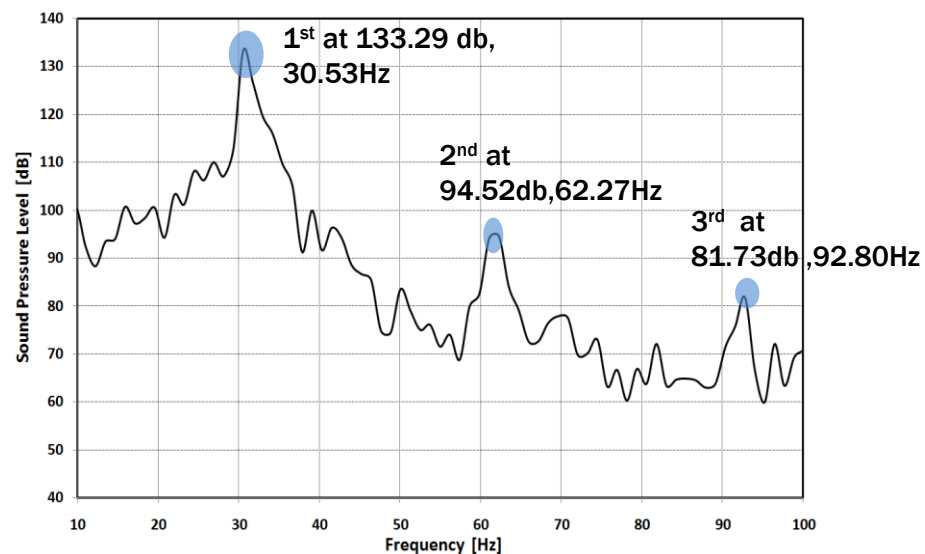
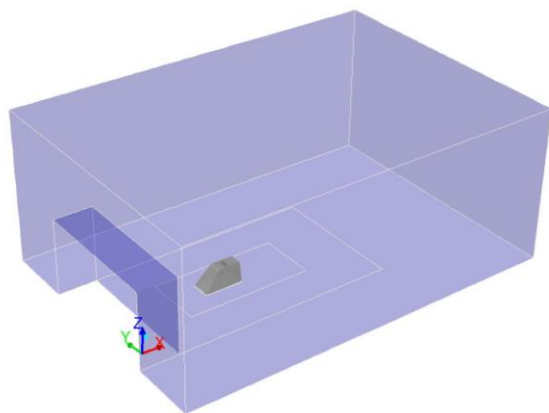
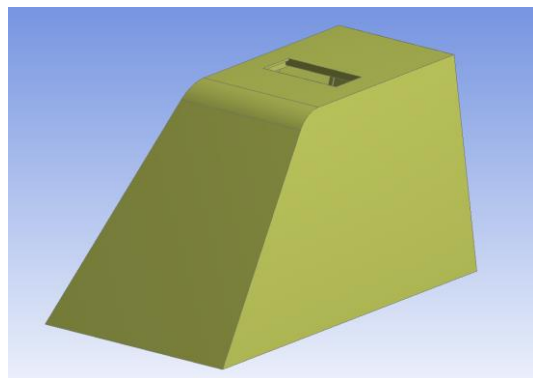


- 阿尔法罗密欧侧后视镜噪声：
 - Aeroacoustics Model – 62 Million Cells
 - Cray XC40 up to 10K cores
 - Simulation Run Time
 - Flow time ~ 0.4 Secs (acoustics sample)

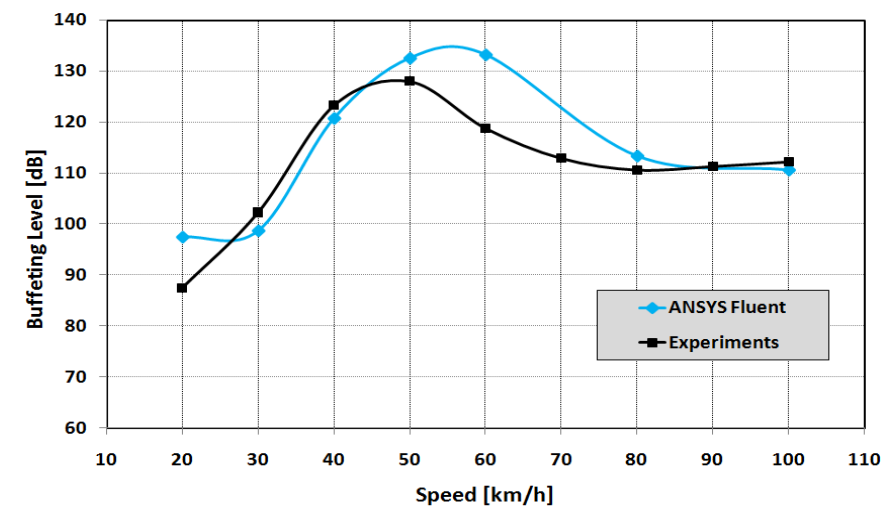
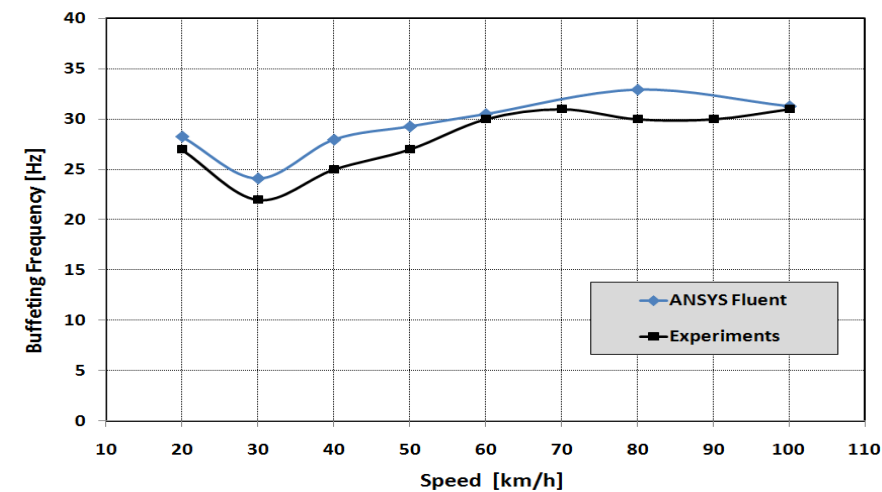
*Images and Experimental Data
Courtesy of FCA - Italy*



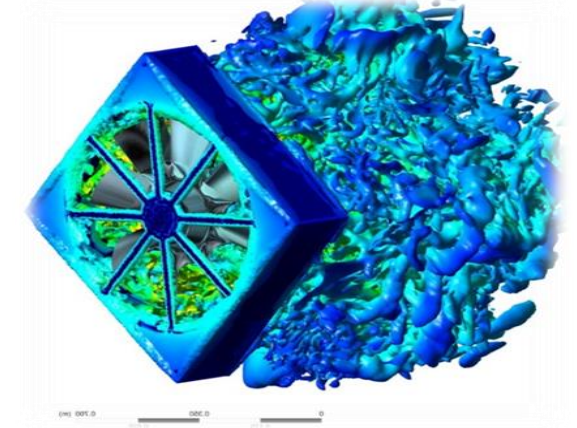
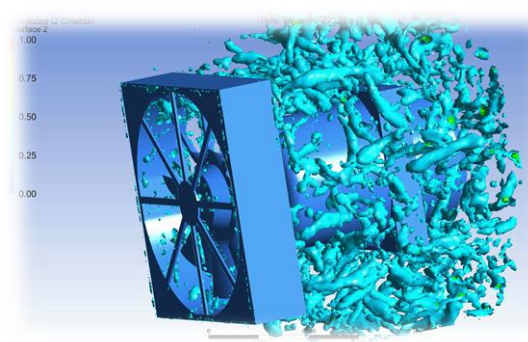
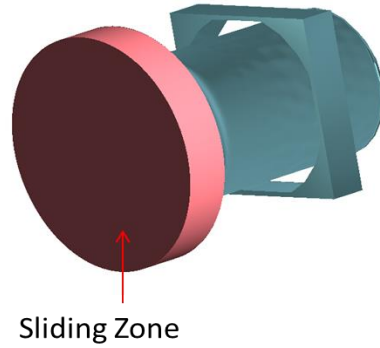
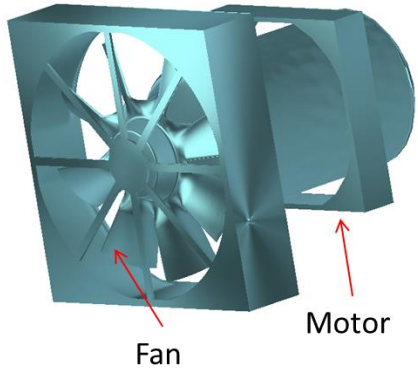
- 现代汽车天窗噪声：



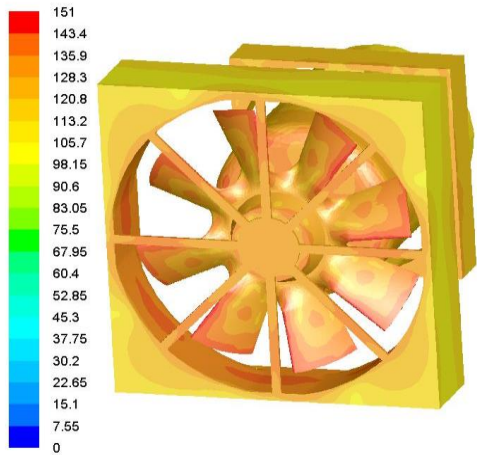
SPL Vs Frequency (for 60 km/h)



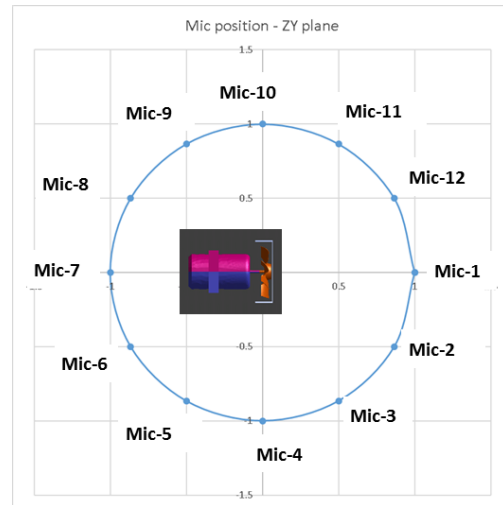
- 轴流风机噪声：



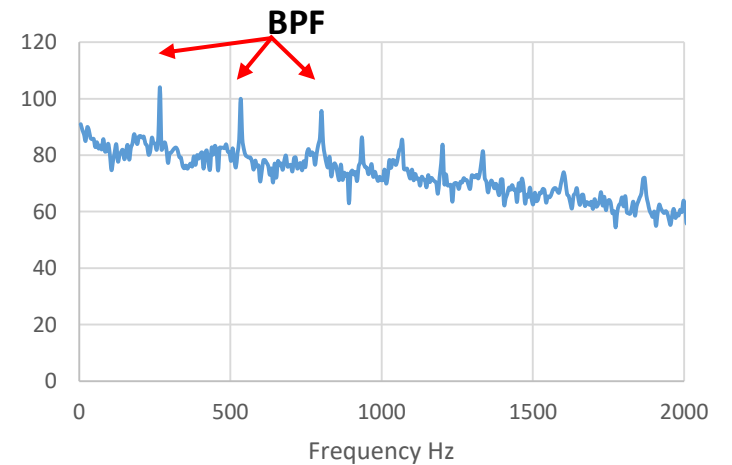
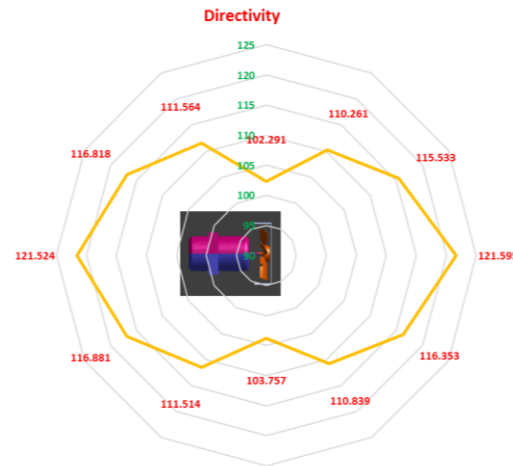
Noise generating turbulence eddies



dB Map – Sound source distribution at 267 Hz

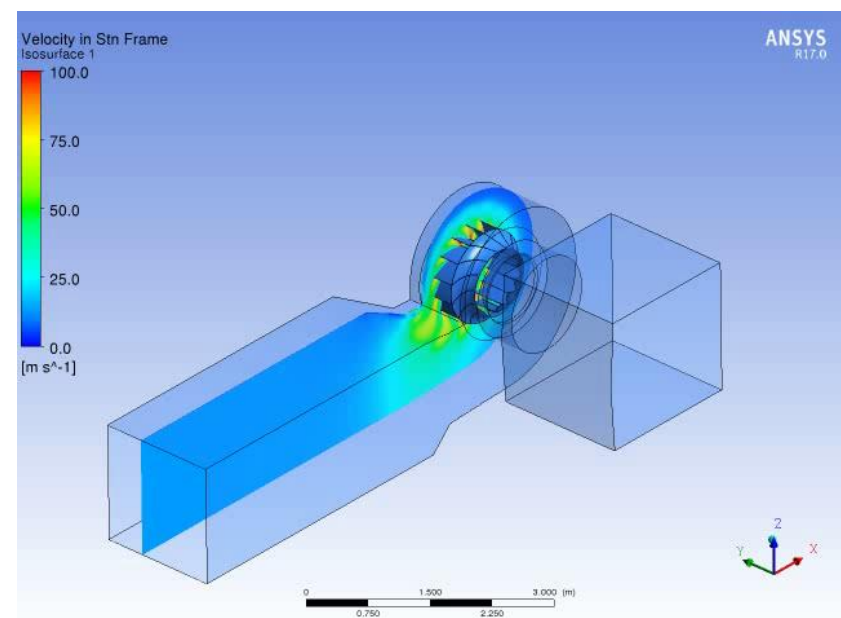
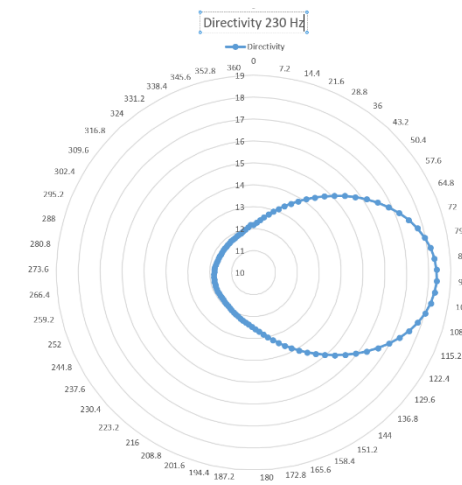
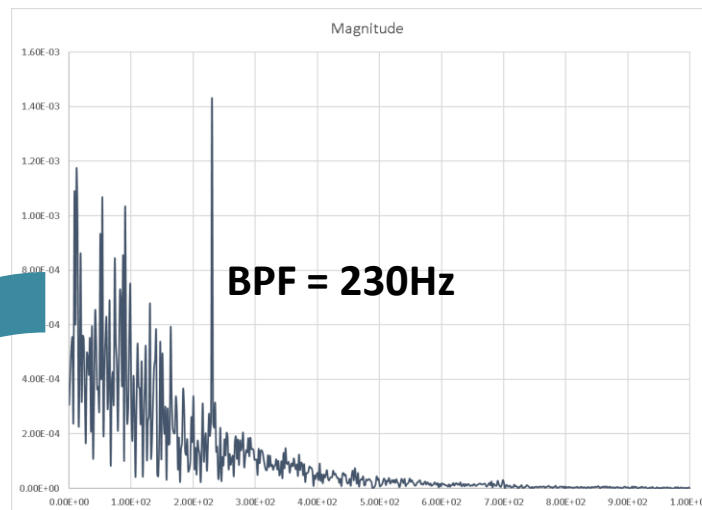
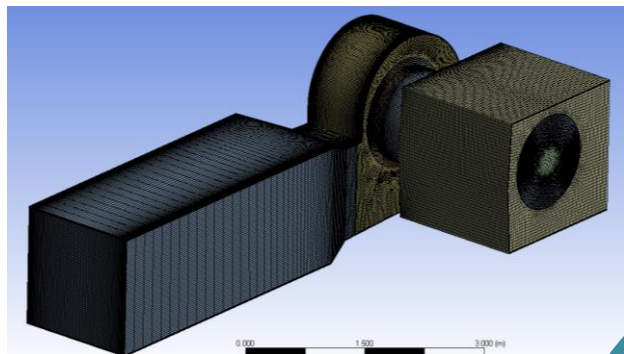
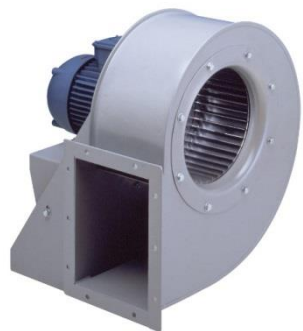


Sound Directivity Plot

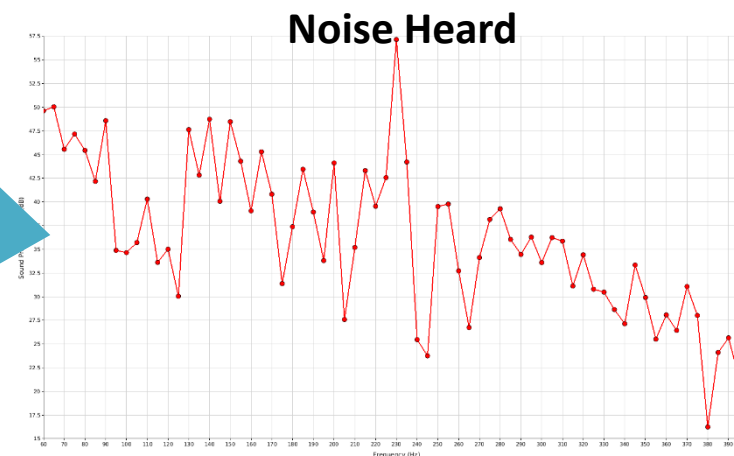


Sound Spectra with Blade Passing Frequencies

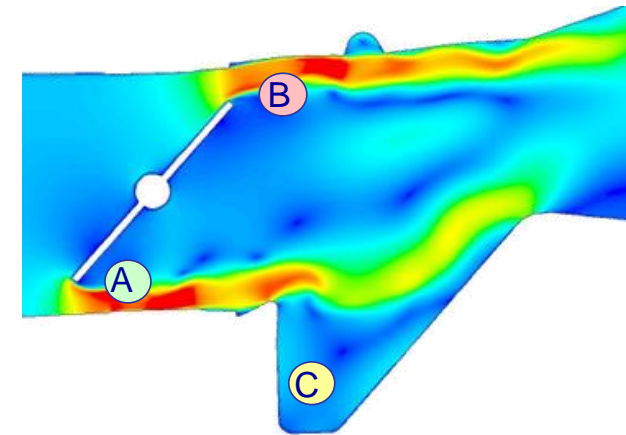
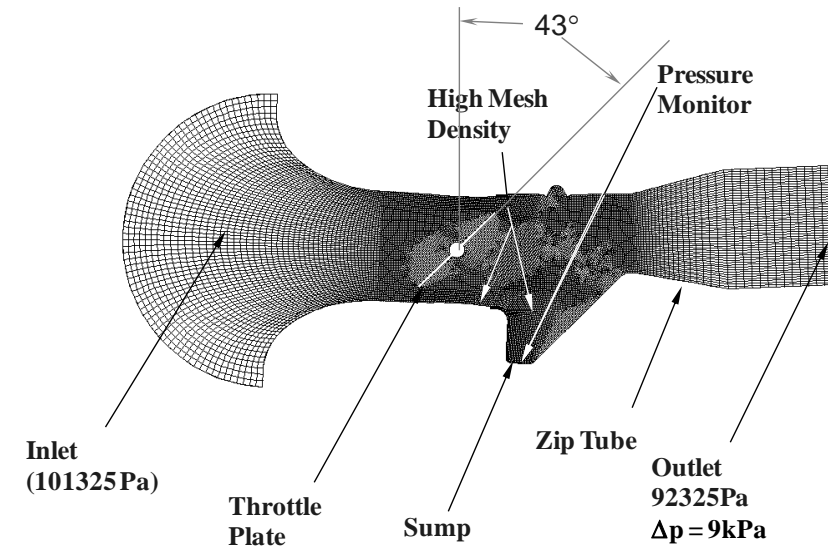
离心风扇噪声：



Realistic Noise Sources
Characterization

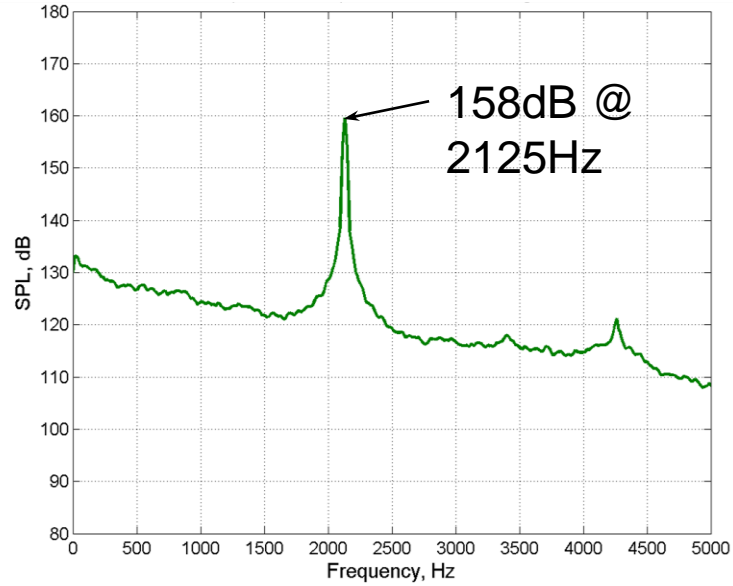


- 进气歧管噪声：
 - Transient RNG Turbulence Model
 - 18,000 2D quad mesh cells
 - Coupled density-based solver, 2nd - order upwind
 - Time step = 2.5×10^{-5} s
 - Air flow from "A" results in shear flow instabilities at the upstream edge of cavity "C"
 - Instabilities excite resonant modes of the cavity "C"

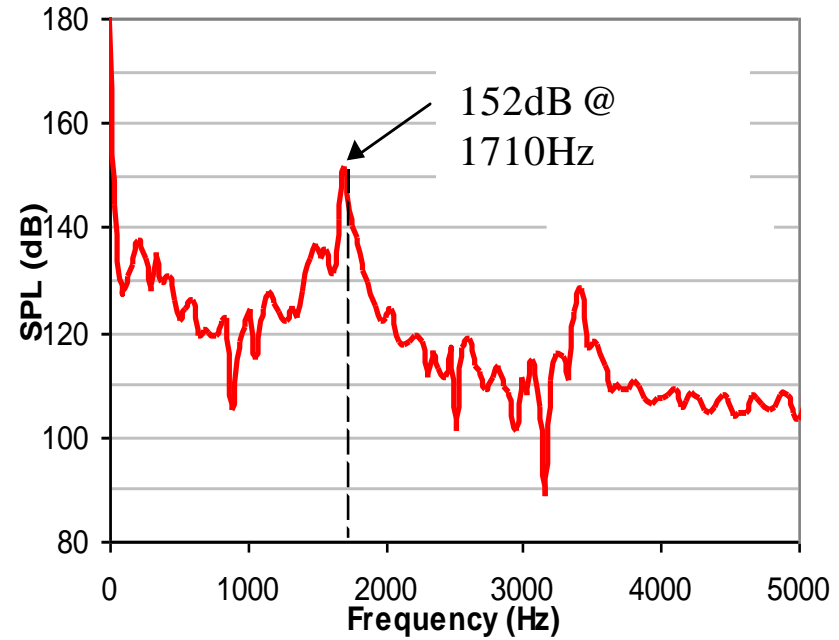


Velocity contours showing shear layer oscillations in 2D simulation at 1710Hz

- 进气歧管噪声：

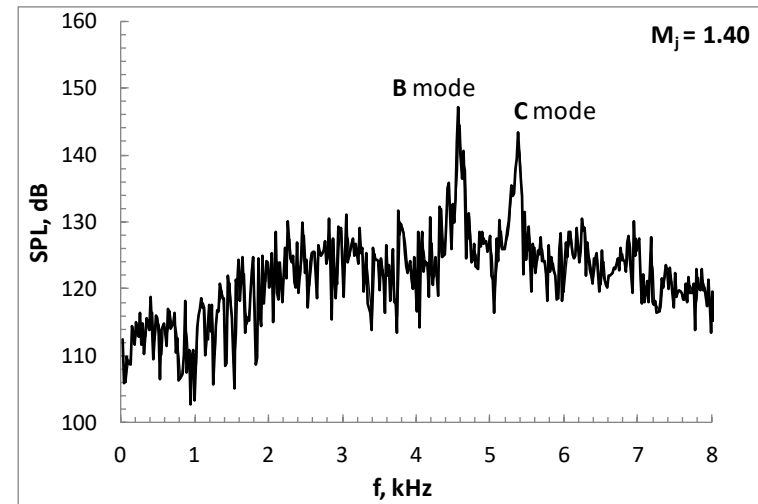
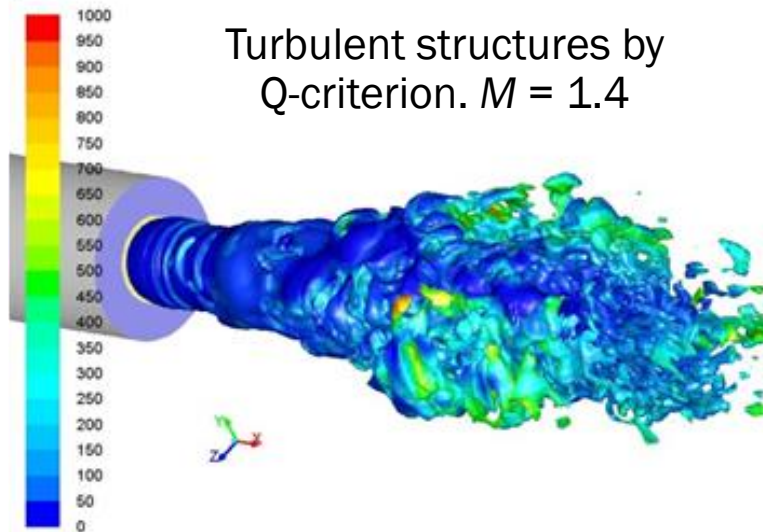
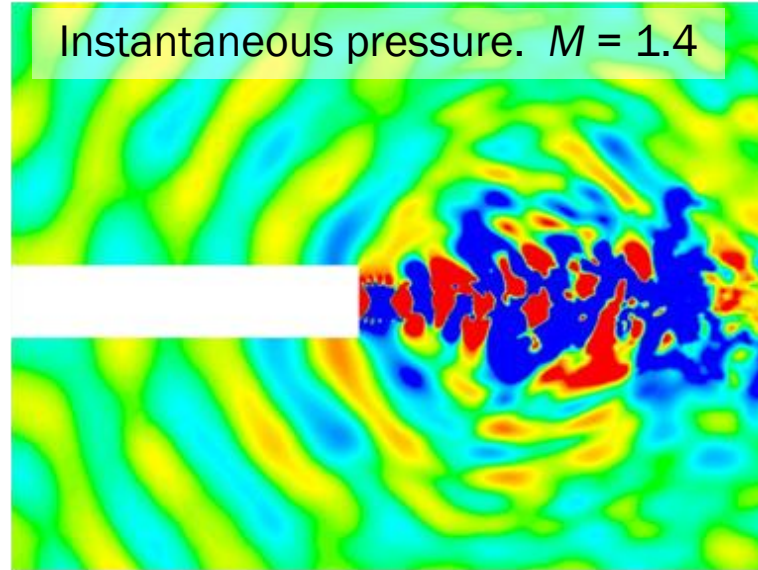
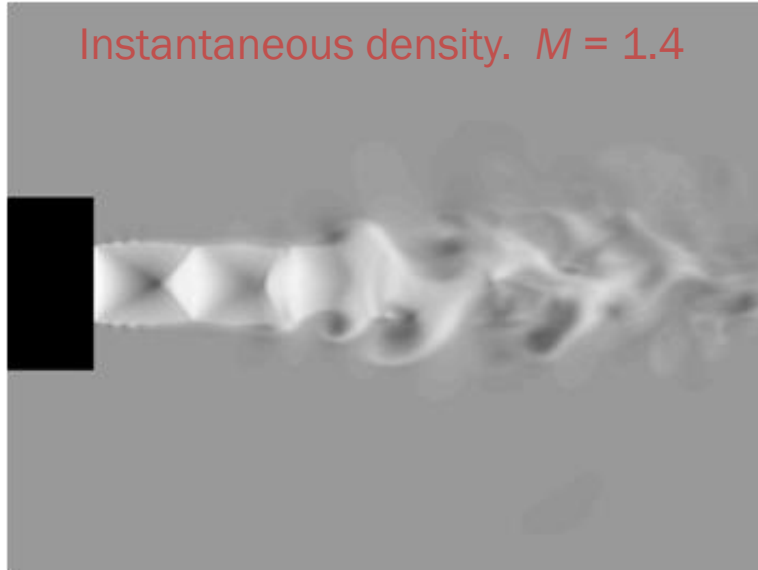


Experiment 3D

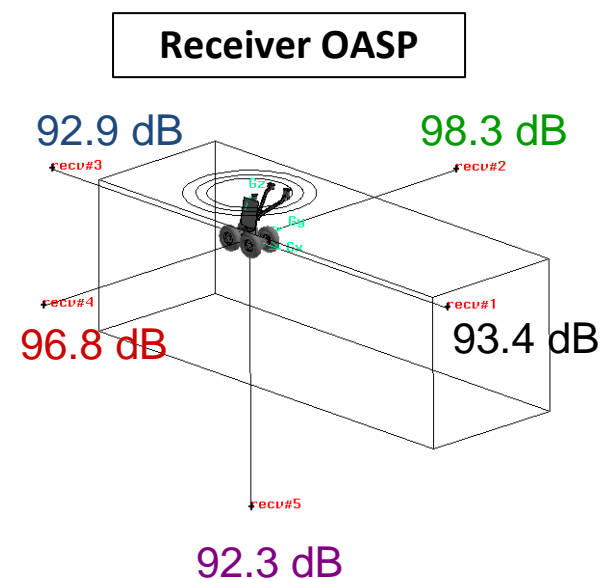


Numerical simulation 2D

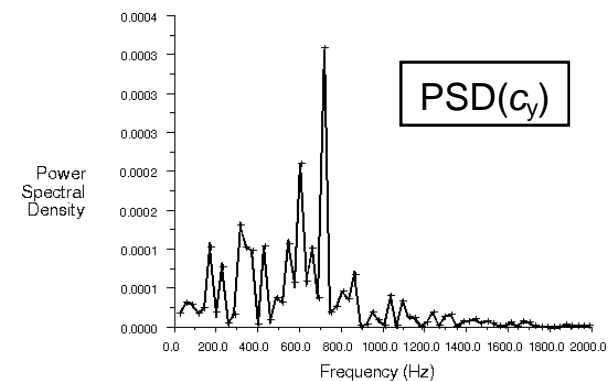
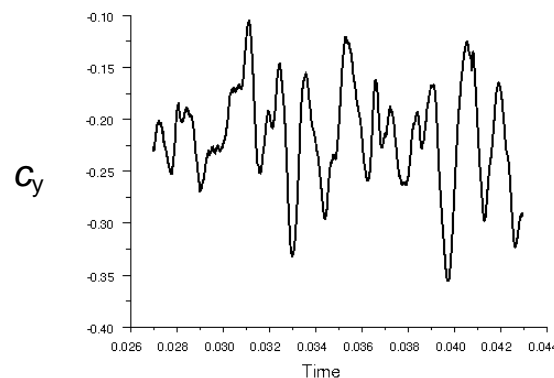
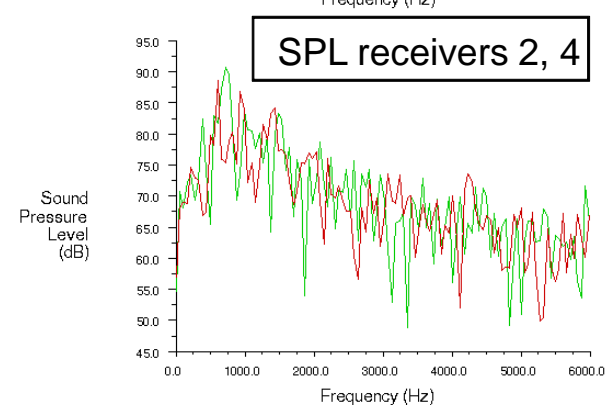
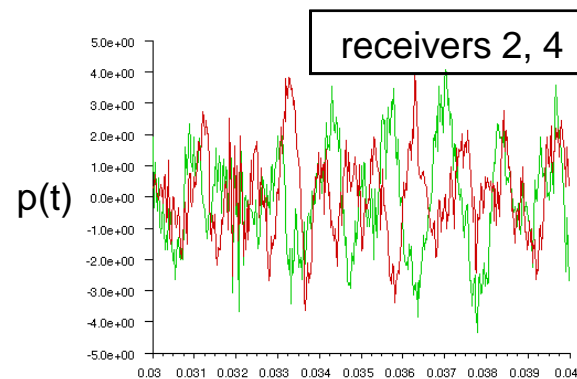
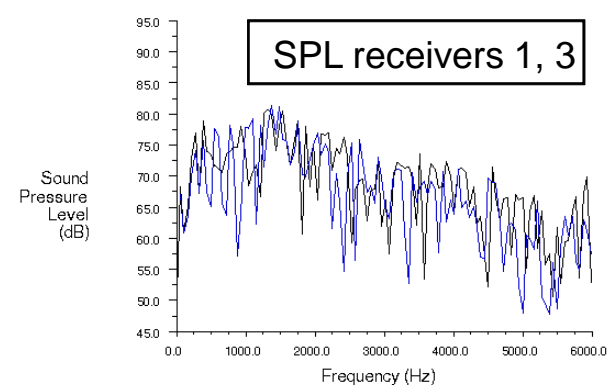
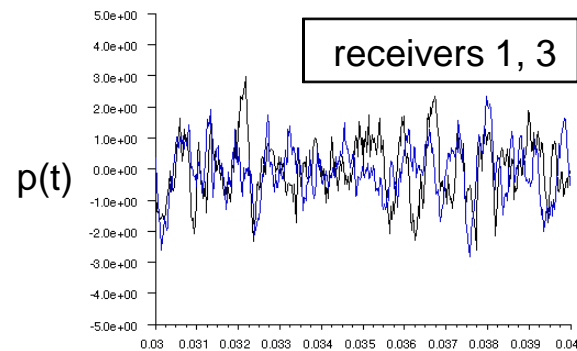
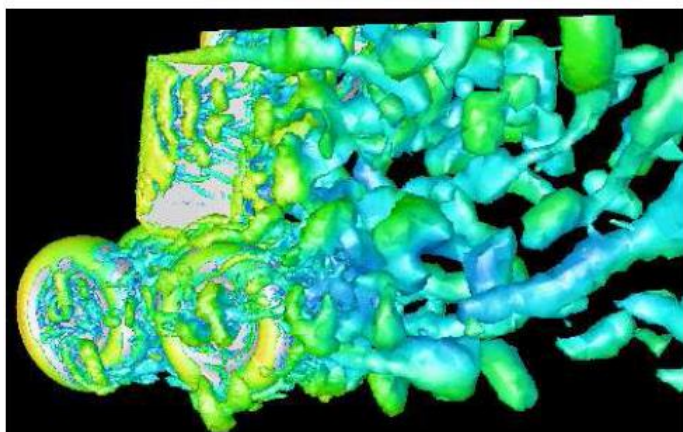
- 喷管射流噪声：



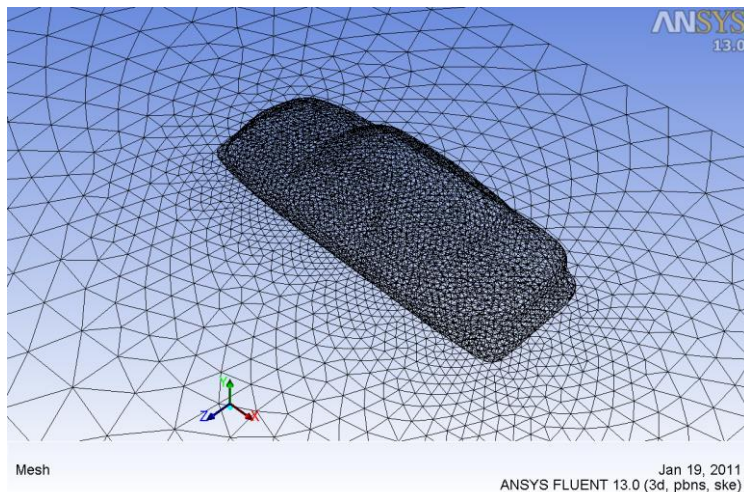
- 飞机起落架噪声：



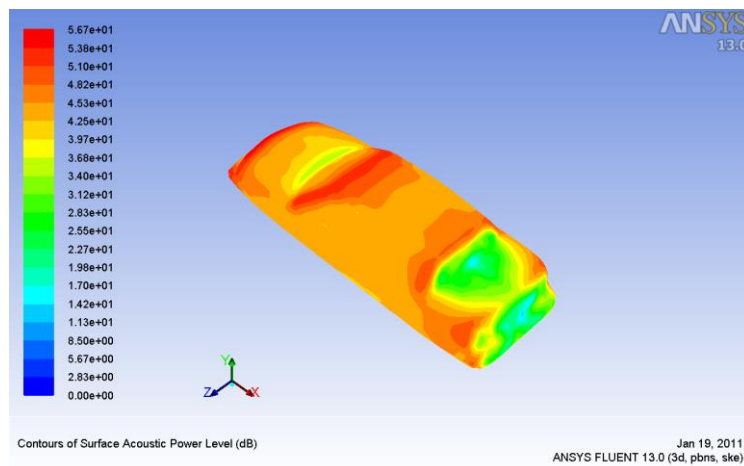
Vortical structures, $(\omega^2 - S_{ji}S_{ij})/2 = (u_0/D)^2$



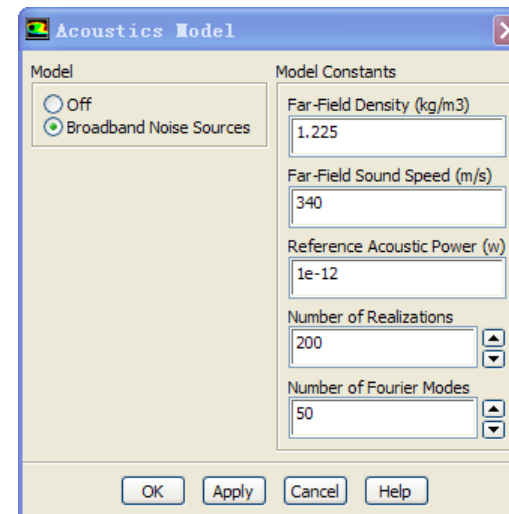
- 基于宽频噪声模型的整车气动噪声：



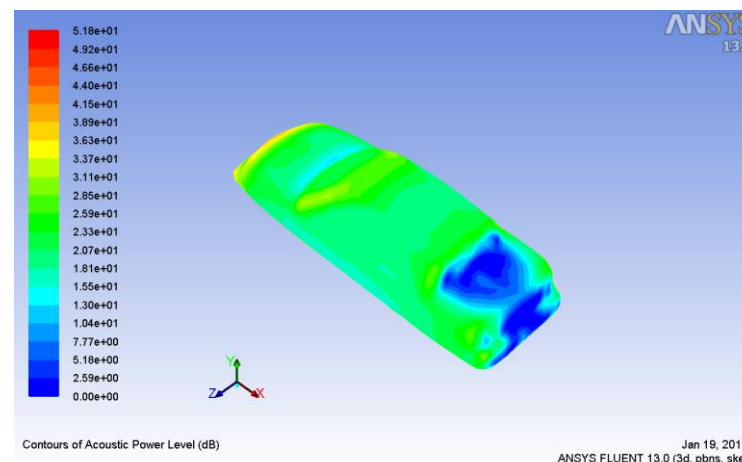
计算网格



偶极子噪声源



激活宽频噪声模型



四极子噪声源对总噪声源的影响



谢谢！

出品 | 安世亚太
PERA GLOBAL



大咖慧，顾名思义，汇集众多大咖智慧。

是由安世亚太打造的一个以设计、仿真、增材制造等领域技术和行业专家为主的智慧学习平台。目前主要通过线上培训、研讨等方式，由行业相关领域资深专家与学员们分享交流最新技术和应用研究成果。

如有任何需求、建议，请关注订阅号（peraglobal），给我们留言

