



# 中高频噪声仿真分析软件 ProNas

主讲人：朱瑞      ProNas产品工程师

## ■ ProNas 产品研发背景

- ProNas 软件概述及其功能与优势
- ProNas 软件界面及模块
- ProNas 软件计算案例
- ProNas 产品应用领域



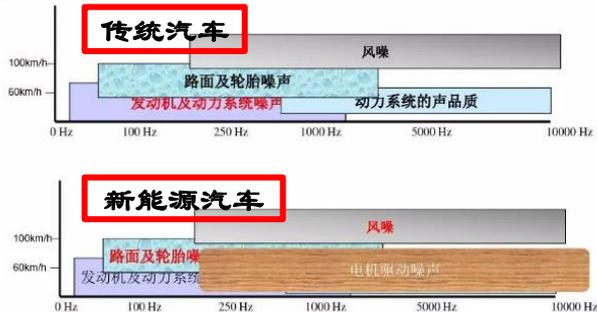
汽车行业



船舶行业



航空航天行业



传统汽车与新能源汽车噪声对比

国际海事组织新标准MSC.337(91)节选

Designation of rooms and spaces	Ship size	
	1,600 up to 10,000 GT	≥10,000 GT
<b>4.2.1 Work spaces (see 5.1)</b>		
Machinery spaces*	110	110
Machinery control rooms	75	75
Workshops other than those forming part of machinery spaces	85	85
Non-specified work spaces* (other work areas)	85	85
<b>4.2.2 Navigation spaces</b>		
Navigating bridge and chartrooms	65	65
Look-out posts, incl. navigating bridge 'wings' and windows	70	70
Radio rooms (with radio equipment operating but not producing audio signals)	60	60
Radar rooms	65	65
<b>4.2.3 Accommodation spaces</b>		
Cabin and hospitals*	60	60
Messrooms	65	60
Recreation rooms	65	60
Open recreation areas (external recreation areas)	75	75
Offices	65	60

和老规范IMO 468(XII)相一致，但要强制执行

标准降低了5dB

船舶噪声新标准节选



高铁机车行业

## 声学数值计算

### ■ 低频问题

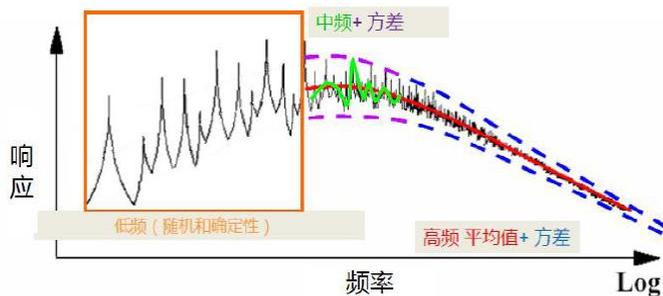
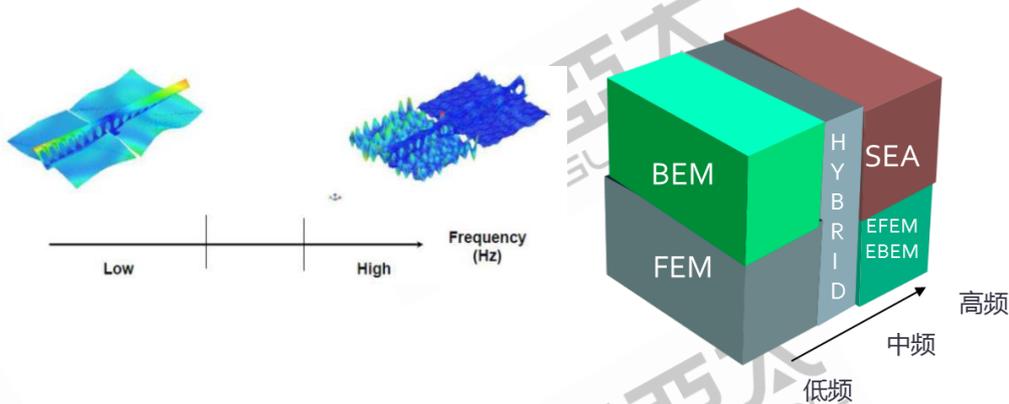
- ◆ FEA (Finite Element Analysis)
- ◆ BEA (Boundary Element Analysis)
- ◆ IFEM (Infinite Finite Element Method)

### ■ 中频问题

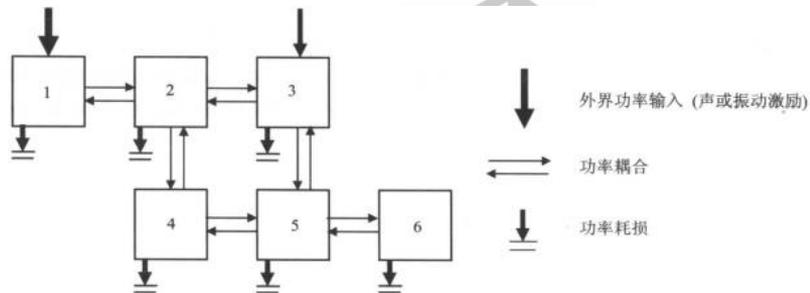
- ◆ Hybrid FEA, SEA/EFEA, BEA

### ■ 高频问题

- ◆ SEA (Statistical Energy Analysis)
- ◆ EFEA (Energy Finite Element Method)
- ◆ EBEA (Energy Boundary Element Method)
- ◆ EFEA-SEA hybrid method



## SEA(统计能量分析)



统计能量分析的功率流示意图

$$\omega \begin{bmatrix} \eta_1 + \sum_{j \neq 1} \eta_{1j} & -\eta_{12} & \cdots & -\eta_{1N} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \sum_{j \neq 2} \eta_{2j} & \cdots & -\eta_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{1N} & \cdots & \cdots & -\eta_N + \sum_{j \neq N} \eta_{Nj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \prod_1^{in} \\ \prod_2^{in} \\ \vdots \\ \prod_N^{in} \end{Bmatrix}$$

$$\omega[\eta]\{E\}=\{\Pi\}$$

能量平衡方程



### 前提假设

- 子系统之间的耦合
  - “弱”耦合假设
  - 保守耦合
- 子系统阻尼
  - “弱”阻尼假设
  - 线性比例阻尼
- 驱动模态力
  - 每个子系统的随机载荷
  - 子系统间的互不相关性

$$E_i = M_i \frac{\sum_j^{N_i} V_{ij}^2}{N_i} = M_i \langle V_i^2 \rangle$$

模态数较大时

结构类振动物子系统i动能方程

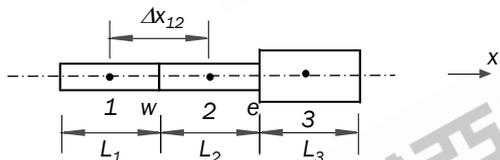
$$E_i = \frac{\langle p_i^2 \rangle}{\rho c^2} V_i$$

声腔类子系统i能量方程



## ProNas能量有限元理论

ProNas能量有限元理论也是将单元离散化，以**单元**为研究对象，利用有限体积法及差分法推导出类似SEA的线性方程组，最后求解得到各**单元的能量密度**，并混合了SEA的**声腔的耦合理论**，成功解决了结构噪声与空气噪声问题，同时保证了求解精度和计算效率。



$$\begin{bmatrix} (\eta_1 + \eta_{e12}^c)\omega & -\eta_{e21}^c\omega & 0 \\ -\eta_{e12}^c\omega & (\eta_2 + \eta_{e21}^c + \eta_{e23}^{dc})\omega & -\eta_{e32}^{dc}\omega \\ 0 & -\eta_{e23}^{dc}\omega & (\eta_3 + \eta_{e32}^{dc})\omega \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \pi_{in1} \\ \pi_{in2} \\ \pi_{in3} \end{Bmatrix}$$

$$\omega[\eta]\{E\} = \{\Pi\} \quad \text{能量平衡方程} \quad \eta_{ej}^c = \frac{2c_g^2}{\eta\omega^2 L_i(L_i + L_j)}$$

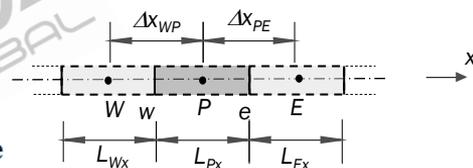
弹性介质中的能量平衡方程：
$$\int_V \pi_{diss} dV + \int_V \nabla \cdot \vec{T} dV = \int_V \pi_{in} dV,$$

能量平衡等式  $\nabla \cdot \vec{T} + \pi_{diss} = \pi_{in}$

阻尼等式  $\pi_{diss} = \eta\omega e$

能量流的近似化处理  $\vec{T} = -(c_g^2/\eta\omega)\nabla e$

最终得到能量密度等式 
$$\frac{d}{dx} \left( \frac{c_g^2}{\eta\omega} \frac{de}{dx} \right) - \eta\omega e + \pi_{in} = 0.$$



对于控制体积的通用动力学控制方程进行积分

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left( \hat{D} \frac{de}{dx} \right) dV - \int_{\Delta V} (\eta\omega e) dV + \int_{\Delta V} \pi_{in} dV = \hat{D}_e A_e \frac{de}{dx} \Big|_e - \hat{D}_w A_w \frac{de}{dx} \Big|_w - \eta\omega e \Delta V + \pi_{in} \Delta V = 0$$

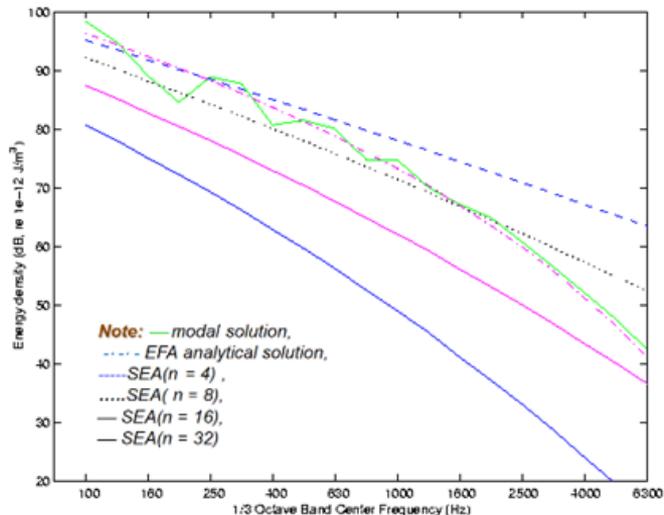
其中单元间的能量流为 
$$\hat{D}_e A_e \frac{de}{dx} \Big|_e = \hat{D}_e A_e \frac{e_E - e_P}{\Delta x_{PE}} \quad \hat{D}_w A_w \frac{de}{dx} \Big|_w = \hat{D}_w A_w \frac{e_P - e_W}{\Delta x_{WP}}$$

从而得到一维杆的能量流的等式

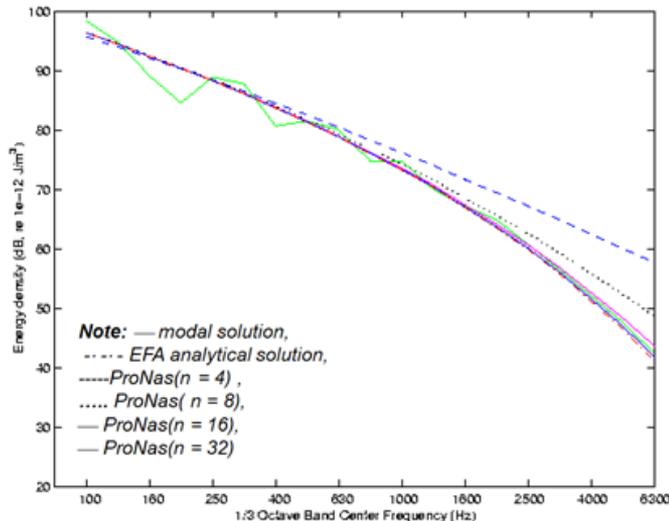
$$\left( \omega \eta \Delta V + \frac{\hat{D}_e A_e}{\Delta x_{PE}} + \frac{\hat{D}_w A_w}{\Delta x_{WP}} \right) e_P - \frac{\hat{D}_w A_w}{\Delta x_{WP}} e_W - \frac{\hat{D}_e A_e}{\Delta x_{PE}} e_E = \pi_{in} \Delta V$$

## 均质梁范例：能量有限元理论带来的进步

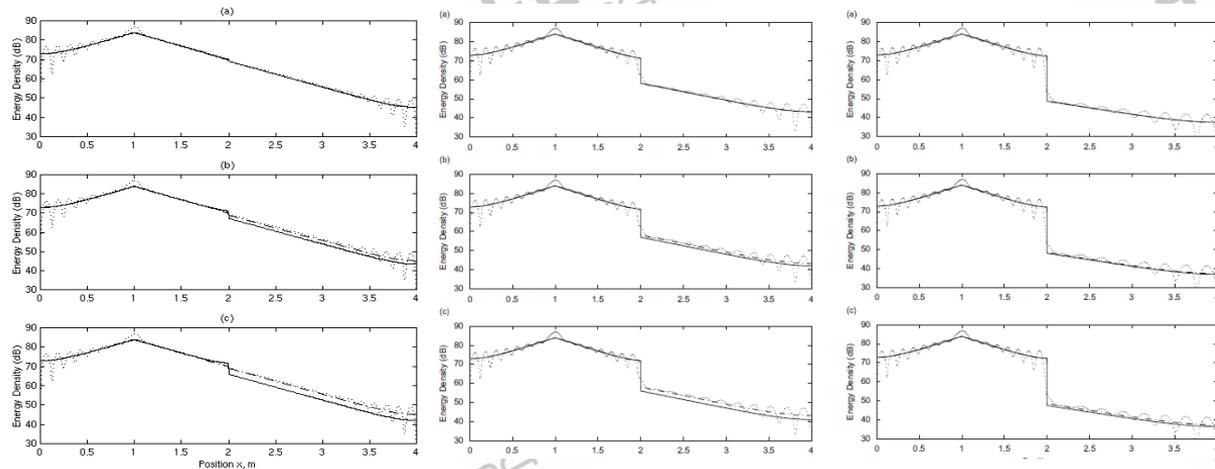
- 当前的统计能量分析



- ProNas带来的进步



## 不同耦合损耗因子计算流程比较——强耦合，中等耦合，弱耦合



强耦合

中等耦合

弱耦合

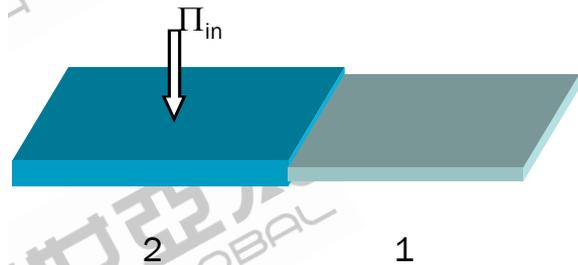


图. - 两个强耦合梁的耦合损耗因子比较:

. . . . ., 解析方法; - - - - -, 有限元方法; —, 高频噪音计算方法;

- (a) ProNas能量有限元法;
- (b) 统计能量法 (手算);
- (c) 统计能量法 (商业软件计算) .

- ProNas 产品研发背景

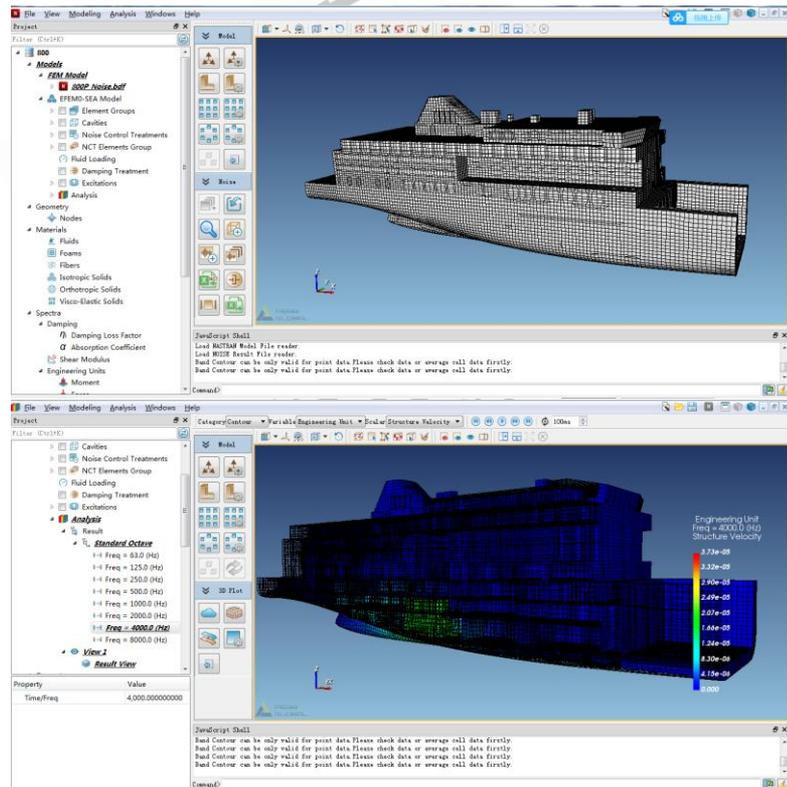
- ProNas 软件概述及其功能与优势

- ProNas 软件界面及模块

- ProNas 软件计算案例

- ProNas 产品应用领域

- ProNas软件是安世亚太联合国际最先进的**中高频专家资源**共同开发、拥有国内自主知识产权的自主可控**中高频噪声**仿真分析软件。
- ProNas混合EFEA-SEA技术和基于能量有限体积算法的工程开发与应用，代表着振动噪声工程界新一代的**前沿技术**。
- ProNas软件建模灵活、能同时兼顾计算效率与求解精度。
- ProNas软件界面简洁友好，易于上手。



采用ProNas/ EFEA-SEA可以有效解决中高频噪声问题，实现以下功能：

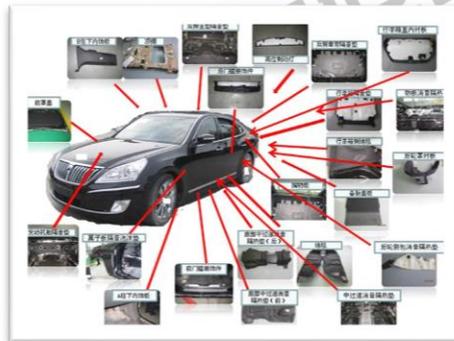
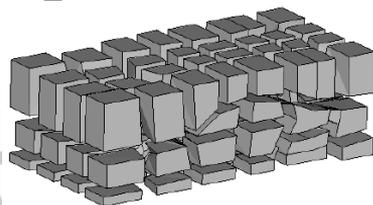
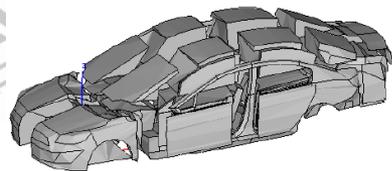
- 整个系统在结构激励或声场激励下广谱的随机噪声振动预测
- 在空气或水等各种介质中的中高频辐射声场的分析和模拟
- 板、壳、梁及声场之间的各种耦合与联结
- 板状结构的中高频振动分析和模拟
- 板-板结构(不同角度，厚度或不同材料参数)之间的联结
- 内部声场(水或空气)的分析和模拟
- 结构与内部声场(水或空气)之间的耦合
- 结构外表面上的声音辐射的分析和模拟
- 标准输入接口：网格输入数据可采用标准有限元格式
- 标准输出接口：程序可以输出标准格式的网格文件和结果文件
- 方便实用的用户界面和接口

## ■ 内部噪声

## ■ 外部噪声

## ■ 隔声性能优化

## ■ 声学包开发



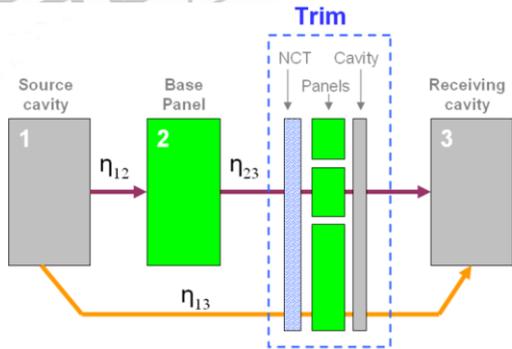
**ProNas能量有限元-统计能量混合模块 (ProNas/EFEA-SEA)** 涉及的基本变量是平均的能量或能量密度，既可以快速建模预测及优化振噪特性，也可以直接使用现有普通有限元网格进行中高频振动的分析和模拟，从而大大节省工程设计人员的建模时间和难度，使工程人员在设计初期能够有效地进行工程预测和优化。

与传统中高频噪声软件相比，ProNas软件具有以下先天性优势，可破解中高频噪声仿真所面临的困境：

- 摒弃了模态密度的概念，不需要反复判断子系统模态密度
- 避免了冗长子系统建模过程，保证了模型的完整性
- 克服了计算结构噪声失真度大的问题
- 消除了噪声控制材料组合与泄露归并简化过程，所见即所得
- 解决了直场和混响场的耦合困难
- 破解了结构阻抗的计算选取困境

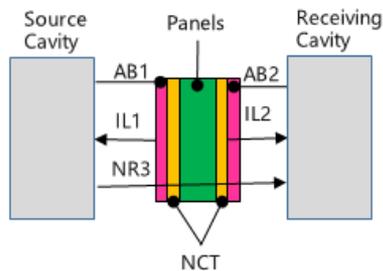
## 更为先进的声学包计算逻辑-在仿真计算**结构噪声**时具有独一无二的优势

传统软件的声学包性能计算逻辑



$\eta_{12}, \eta_{23}$ ---Resonant path  
 $\eta_{13}$ ---Non-Resonant path (mass law)

ProNas的声学包性能计算逻辑



AB1, AB2---Absorption Coefficient  
 IL1, IL2---Insertion Loss for Structure borne Noise  
 NR3---Transmission Loss for Airborne Noise

# 领先的声学处理模块AM模块-----基于先进的声学材料性能计算理论-Biot理论及传递矩阵理论可精确计算材料的隔声性能与吸声性能

Layer: Lay-up NCT Plot

Name 2 layer

Layer

- Foam
- Fiber
- Gap
- Panel
- Screen
- Membrane
- Perforated Plate

1. Double-click the mouse to create a layer of material.  
2. Hold down the Ctrl key and double-click the mouse to create multi-layer material.

流体侧 厚度 固体

Type	Thickness (m)
1 Foam	0.03
2 Panel	0.001

Fluid Side Structure Side

Property	Value
Solid	Polyester foam - 30 kg/...
Fluid	Air

流体 选用声学基础材料

- Ctrl + Up/ to move up one row.
- Ctrl + Down/ to move down one row.
- Delete/ to delete one row.

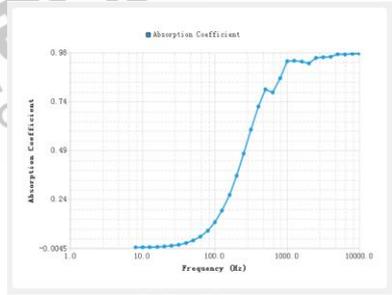
Properties

Minimum Field Angle: 0.00 degree Total Thickness: 0.031 m

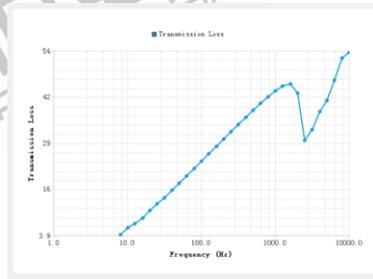
Maximum Field Angle: 78.00 degree Boundary Condition: Hard Wall

Note: 声学包分析参数

OK Compute Cancel Apply



声学材料吸声系数计算



声学材料隔声量计算

备选声学材料特性

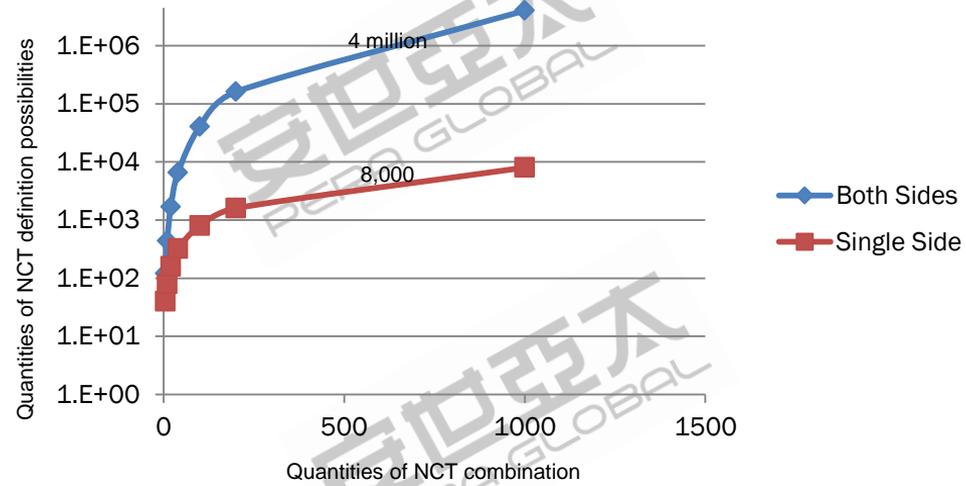
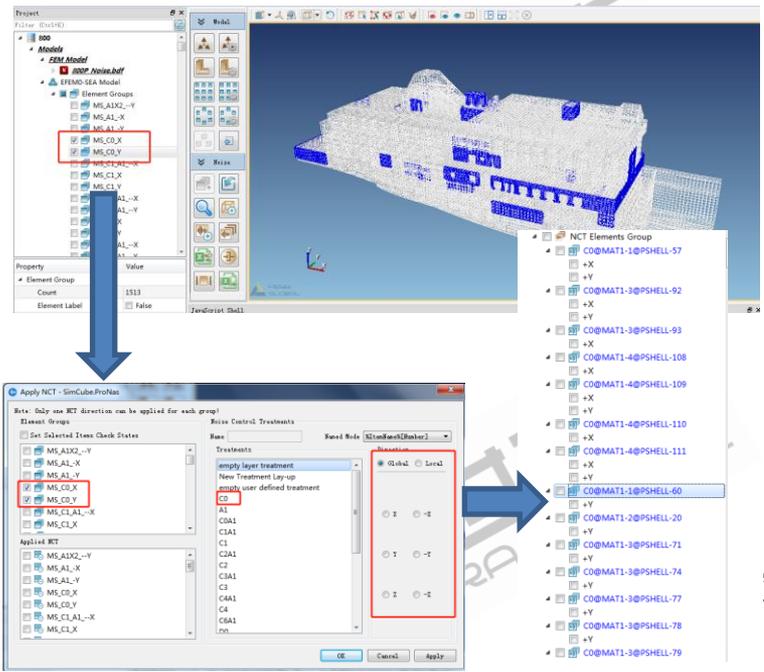
结构侧 选用声学材料特性

流体 选用声学基础材料

入射角度范围

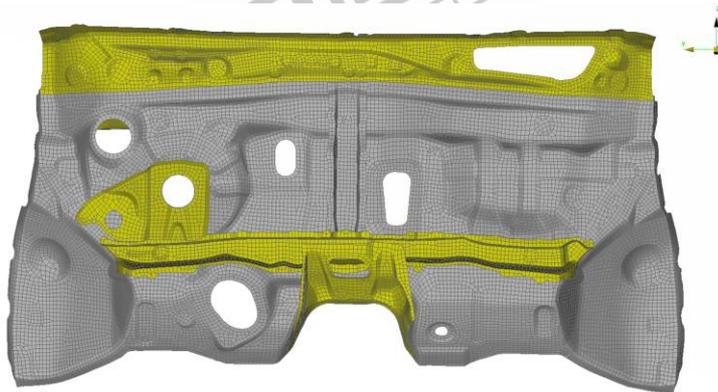
总厚度 边界条件

# 声学包自动分组功能

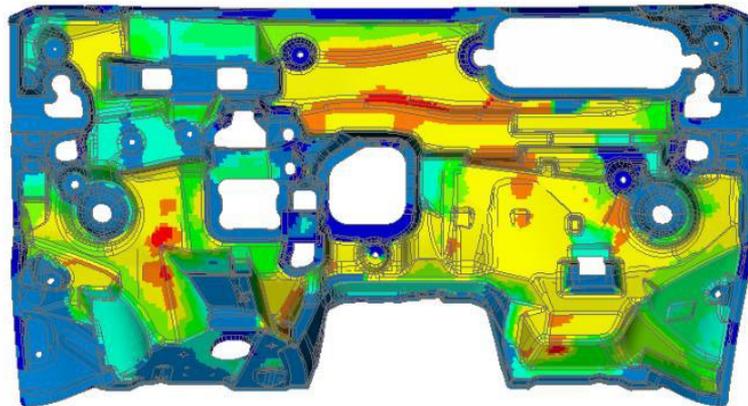


ProNas的声学包采用手工基板单面施加NCT，软件自动基板双面施加NCT的加载方式；传统声学包采用基板双面手动施加NCT的加载方式。与传统声学包加载方式相比，ProNas理论上可成百上千倍的提高工程师加载NCT的效率。

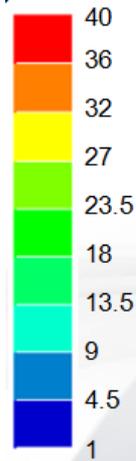
在有限元模型上按实际精确分布噪音控制材料、不均匀材料、泄露、直达声场分布载荷等一系列参数，所见即所得



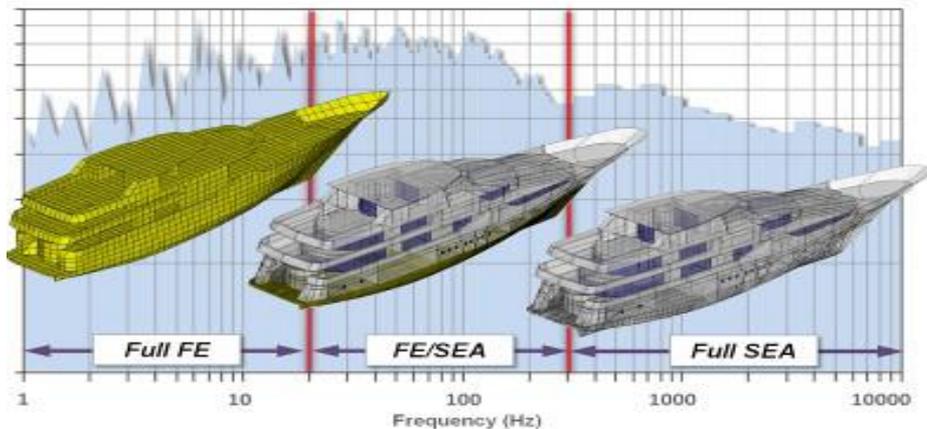
前围钣金有限元模型



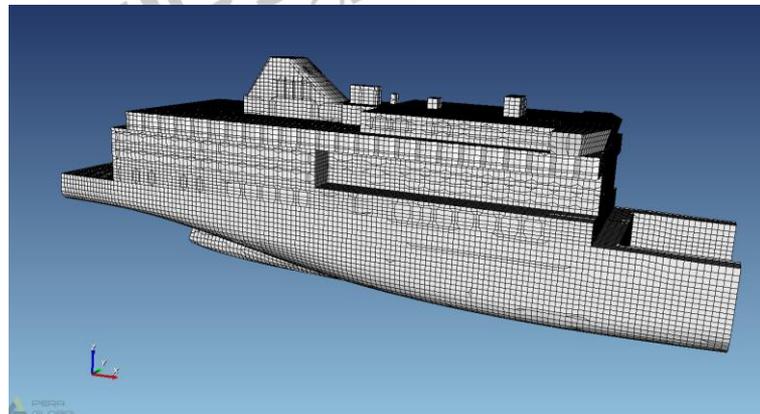
前围隔热垫厚度分布图



## 在解决中频高频问题时，ProNas声学模型通用



传统软件仿真模型



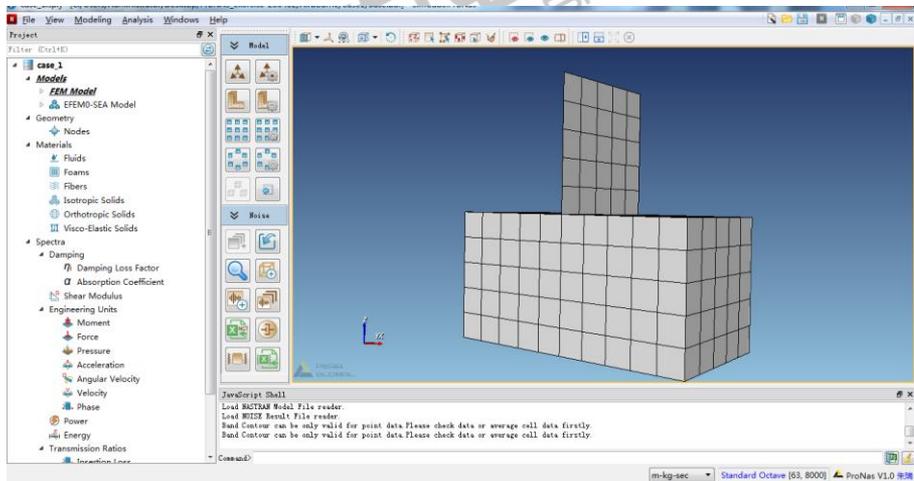
ProNas软件仿真模型

## 总结：

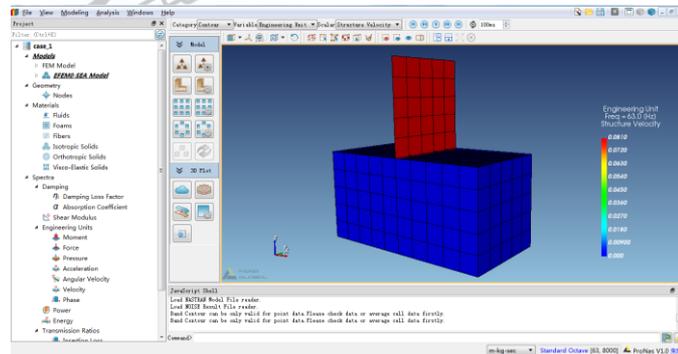
- 更为宽范的应用范围（强耦合、大阻尼）
- 更为高效的计算效率
- 更为精确的求解结果（核心算法）
- 与传统软件相比，更大程度缩短研发周期，减小研发成本
- 降低工程应用人员实际操作门槛，不要求工程人员具备专门知识，为解决中高频问题提供新的方法
- 良好的可视化响应功能，快速直观显示问题热点，为优化明确方向
- 更为简洁的软件界面，易用方便，上手较快

- ProNas 产品研发背景
- ProNas 软件概述及其功能与优势
- ProNas 软件界面及模块
- ProNas 软件计算案例
- ProNas 产品应用领域

# ProNas软件主要用来解决中高频结构噪声和空气噪声问题



ProNas前处理界面



ProNas后处理界面

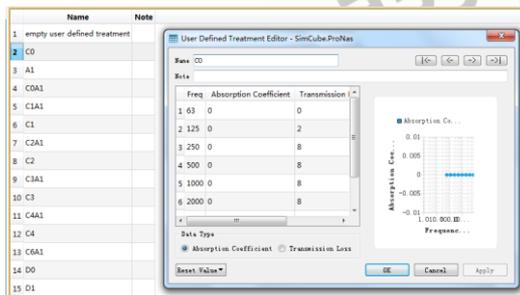
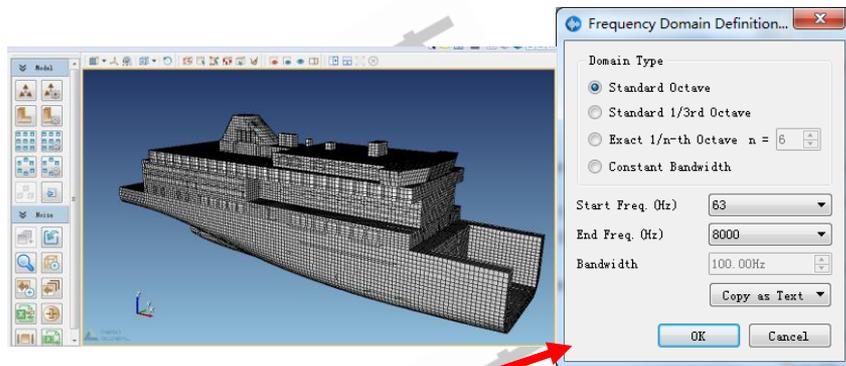
## ProNas软件主要模块包括:

### ■ ProNas 标准包

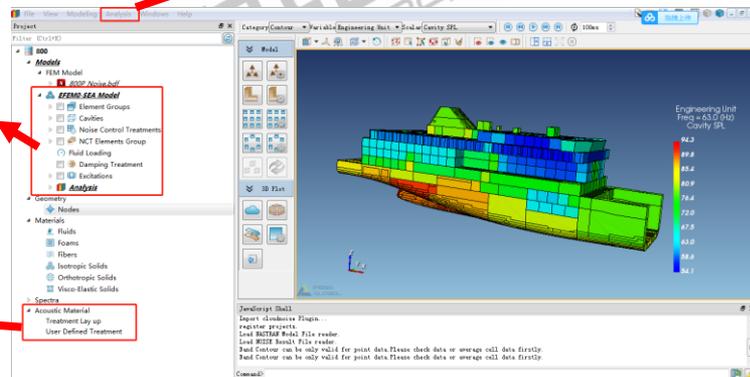
ProNas/GUI 用户界面、建模基本环境及前后处理

ProNas/EFEA-SEA 能量有限元-统计能量混合模块

### ■ ProNas/AM (Acoustic Materials) 声学材料模块



- ▶ **800P Noise.bdf**
- ▶ **EFEM0-SEA Model**
- ▶ Element Groups
- ▶ Cavities
- ▶ Noise Control Treatments
- ▶ NCT Elements Group
- ▶ Fluid Loading
- ▶ Damping Treatment
- ▶ Excitations
- ▶ Analysis



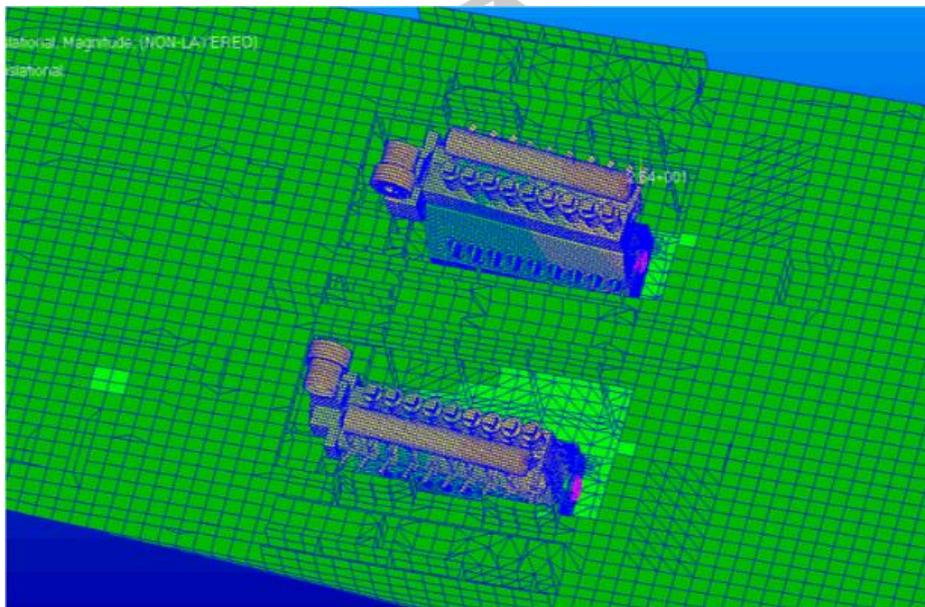
- ProNas 产品研发背景
- ProNas 软件概述及其功能与优势
- ProNas 软件界面及模块
- **ProNas 软件计算案例**
- ProNas 产品应用领域

# ProNas船舶中高频噪声计算

## 某客箱船噪音计算

案例是我国自主研发建造的第一艘大型客箱船，也是迄今全球最大客箱船船长近200米，船宽超20米，船舶总吨2万吨以上，载客定额约800人，载货460标准箱。该船于已正式投入运营。（注：本案例征得客户同意，已做脱密处理）

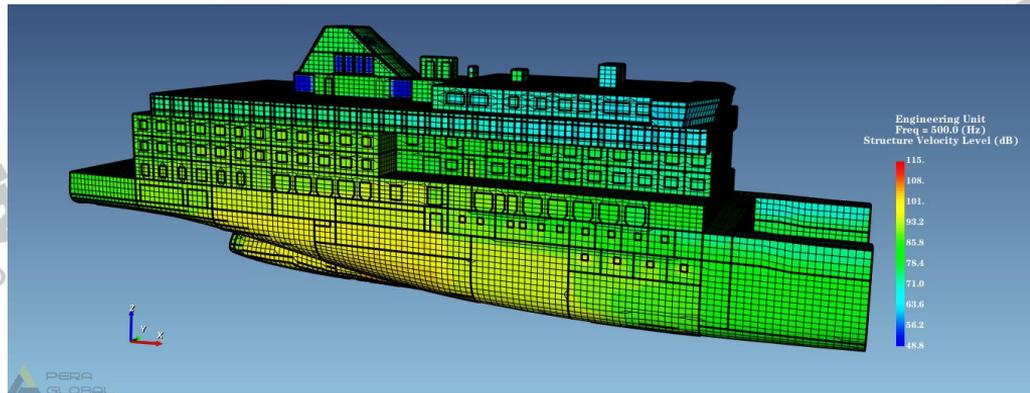




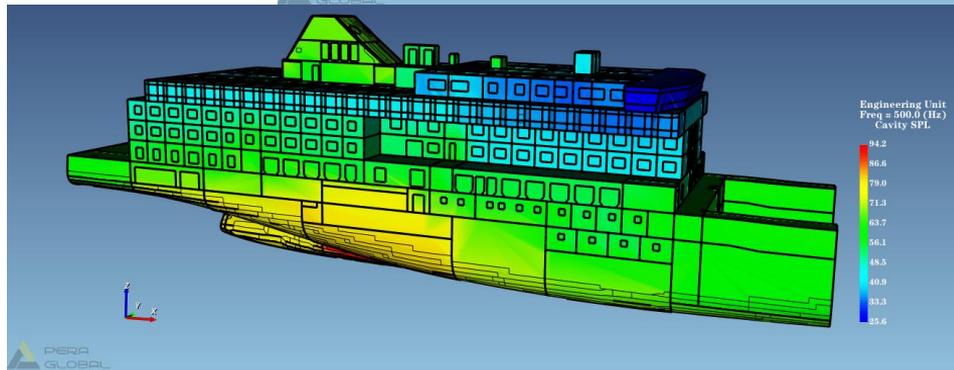
该客箱船采用双机双桨配置，该船的最大特点是采用了两台低速机，这是我国造船史上首次采用**低速机**建造的客船，振动和噪音的风险非常高。

单台主机**重量超过300吨**，直接螺栓固定在船体上，船舶在整个运营寿命周期必须时刻直接承受其带来的巨大的振动和噪音能量。

结构噪音载荷结果云图, 500Hz



结构速度云图

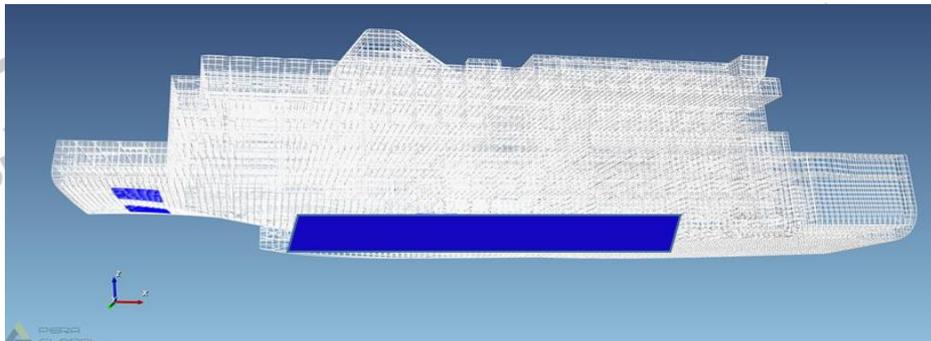


舱室声压云图

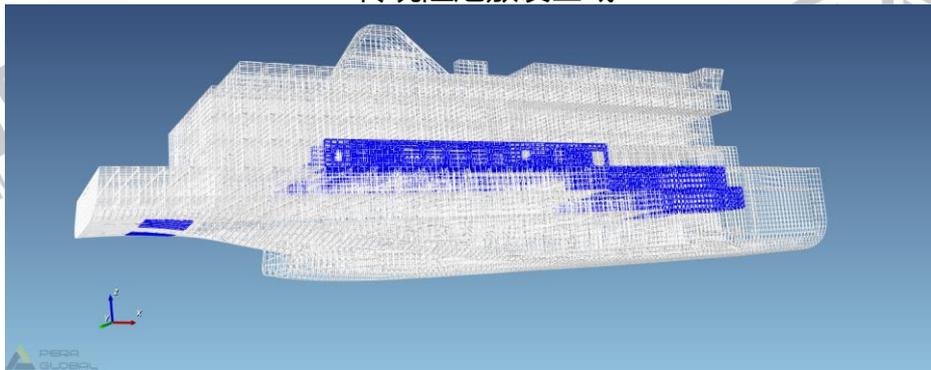
第一轮计算表明共91个房间噪音大幅度超标，大部分为主机和螺旋桨结构噪音导致，下图为部分不达标舱室。

舱室	分频段声压级dB(A)								A计权声压级dB (A)	目标声压级dB (A)	结果
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz			
room-7138	39.7	77.9	75.5	64.3	49.2	38.7	56.5	25.6	69.2	55	不满足
room-7137	38.9	77.2	75.5	66.8	51.5	38.8	56.7	26.3	69.6	55	不满足
room-7135	38.9	77.1	75.5	66.8	51.2	36.7	53.3	22.6	69.5	55	不满足
room-7134	39	77.2	75.6	66.9	51.2	35.1	48.3	17.3	69.5	55	不满足
room-7133	38.9	77	75.5	66.8	51.1	35.4	50.1	19	69.4	55	不满足
room-7132	41	76.6	74.6	65.2	49.8	38.3	52.7	23.8	68.5	55	不满足
room-8112	40.5	88	89.8	82.6	65.7	41.3	49.3	20.4	83.8	55	不满足
room-8111	40	88	89.8	82.6	65.8	43.3	54.3	26.8	83.8	55	不满足
room-8110	40	87.9	89.7	82.6	65.7	41.7	50.9	22.9	83.7	55	不满足
room-8109	41	89.1	89.7	82.6	65.8	44.4	57	30.5	83.8	55	不满足
room-8134	40.5	89	93.2	93.1	80.2	54.2	56.6	31.3	91.4	55	不满足
room-8133	41	89.3	92.8	92.1	78	51.8	59.7	35.2	90.5	55	不满足

**最终本案例共敷  
设阻尼4000平方米，  
约35吨，采用了阻尼  
隔离的概念，虽然基  
本全部采用了单倍板  
厚阻尼的敷设方法，  
其敷设面积和敷设重  
量仍然创造了国内民  
船阻尼应用的新纪录，  
同时也是世界单船大  
规模应用单组份阻尼  
的首个案例。**

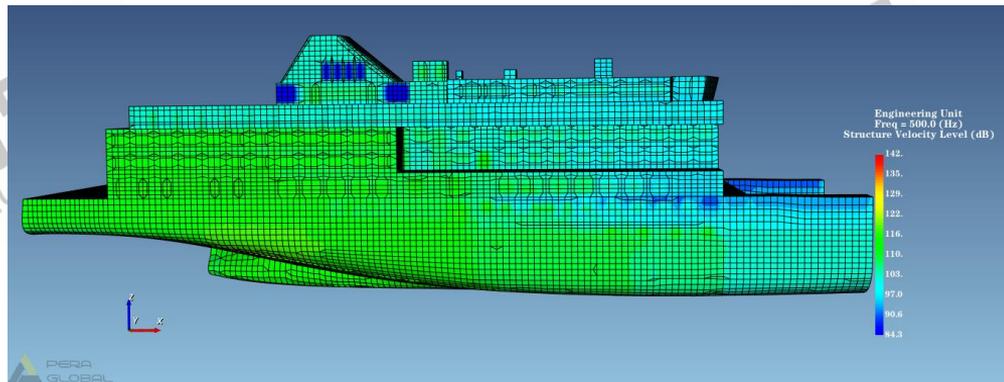


传统阻尼敷设区域

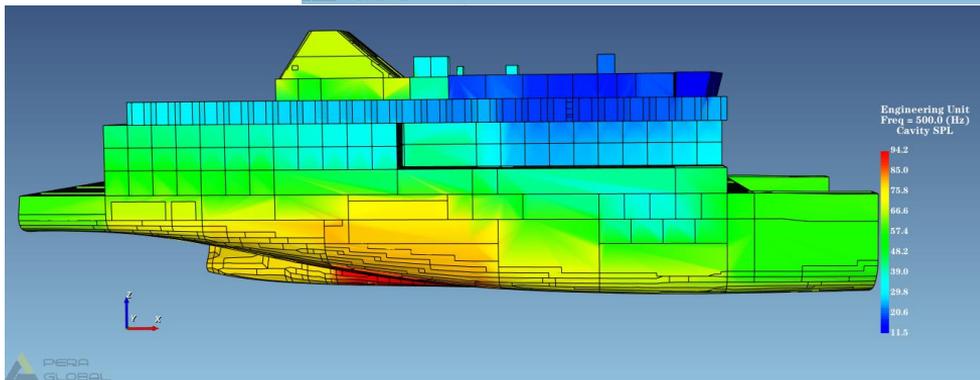


本案阻尼敷设区域

整改后结构噪音载荷结果云图, 500Hz

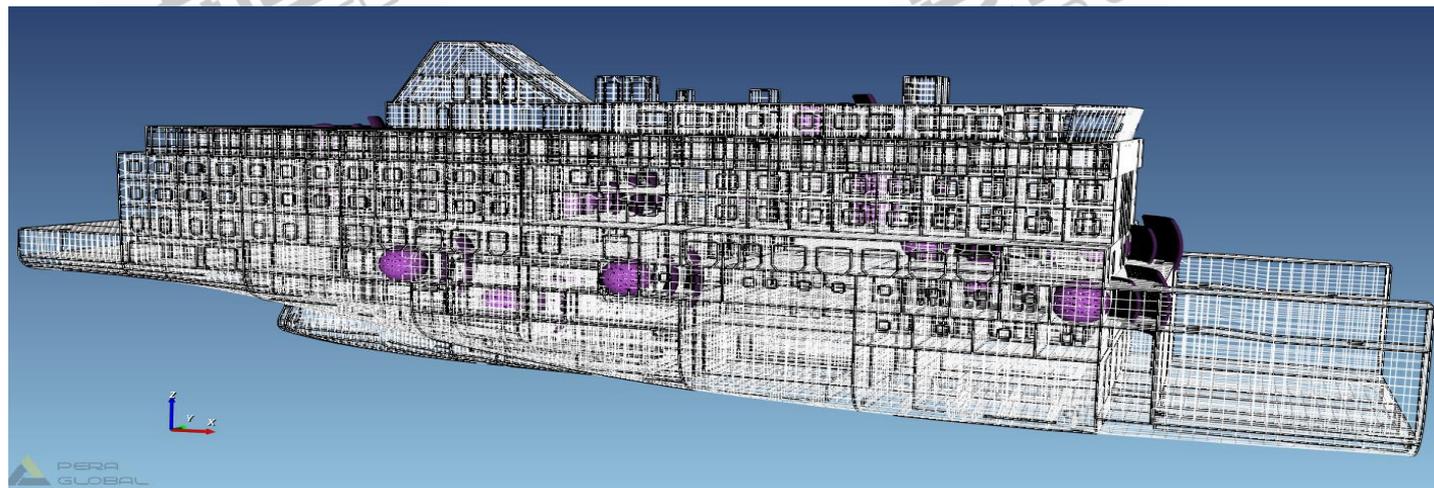


结构速度云图

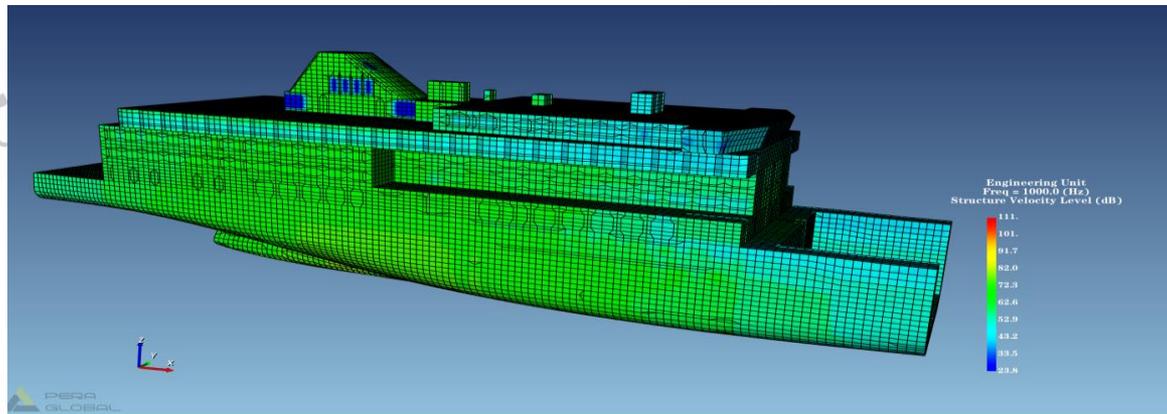


舱室声压云图

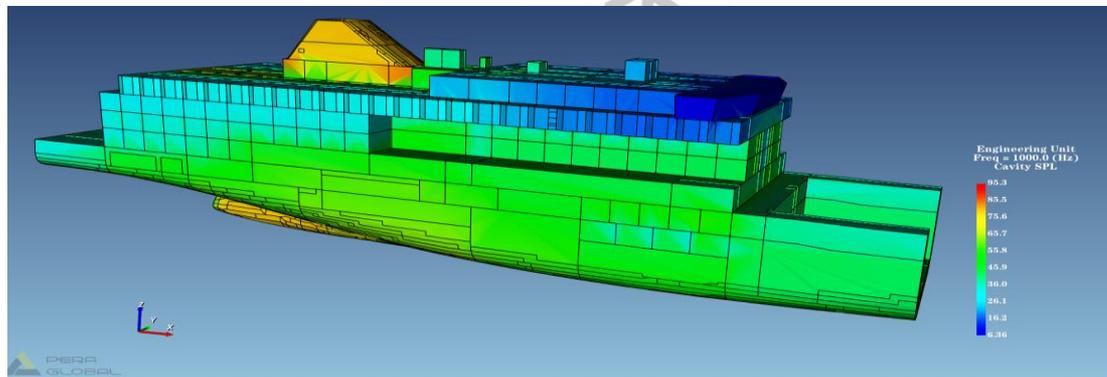
## 空气噪音载荷分布



空气噪音载荷结果云图,  
500Hz



舱室声压云图



结构速度云图



## 某船舶空气噪声优化方案

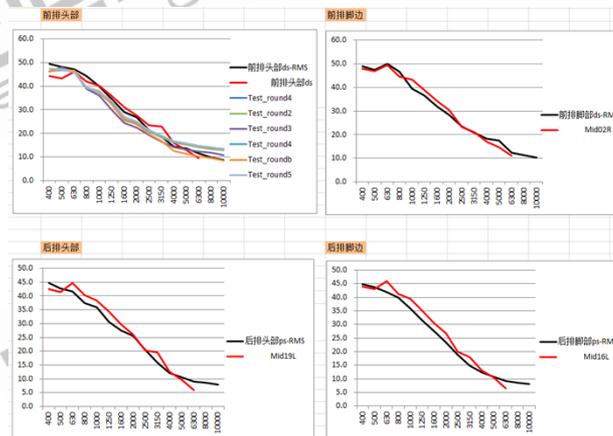
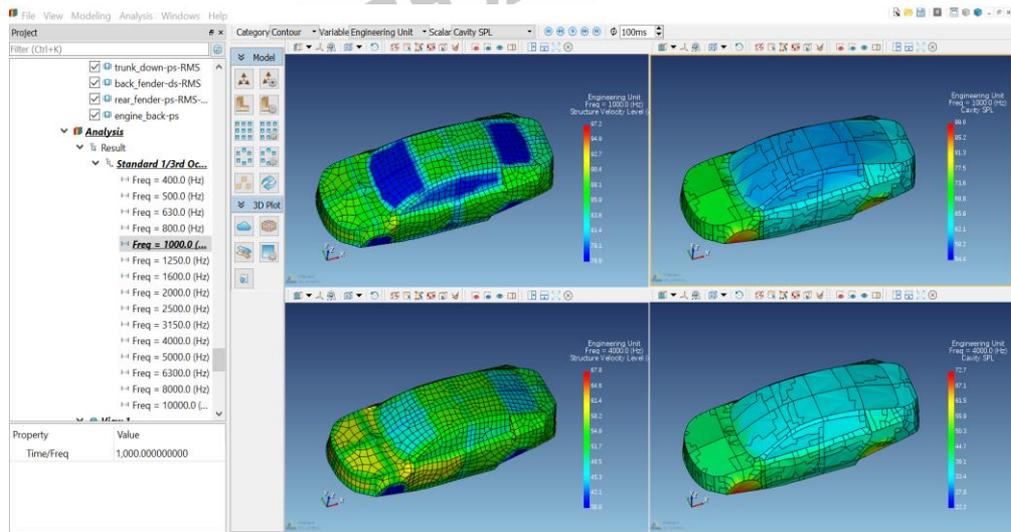
1. 部分娱乐室及放映室等地面浮动地板均改为50mm岩棉+钢板+阻尼+钢板型，再在上侧加10mm流平甲板敷料。
2. 部分甲板厨房抽风机室的内部，艏、中、艉面增加4mm钢板做成双墙舱壁，形成密封夹层空间，两层钢壁都设阻尼涂料。
3. 甲板房间合计26间处所的天花板需穿孔（穿孔面向室内），孔径按1.8mm。壁板不穿孔。
4. 在部分甲板机舱棚两侧直接面向公共处所和房间的舱壁，在外侧增加4mm压筋板做成的舱壁，形成密封的夹层空间，夹层内设50mm隔音棉。
5. 部分甲板均设9mm厚阻尼涂料处理。

经过以上方案优化并多轮仿真计算，优化以后各舱室噪声控制效果较好，将以上优化方案应用到实船设计中，并对该客箱船实船舱室进行了噪声测试，如下表所示，大多舱室噪声数值满足设计要求。

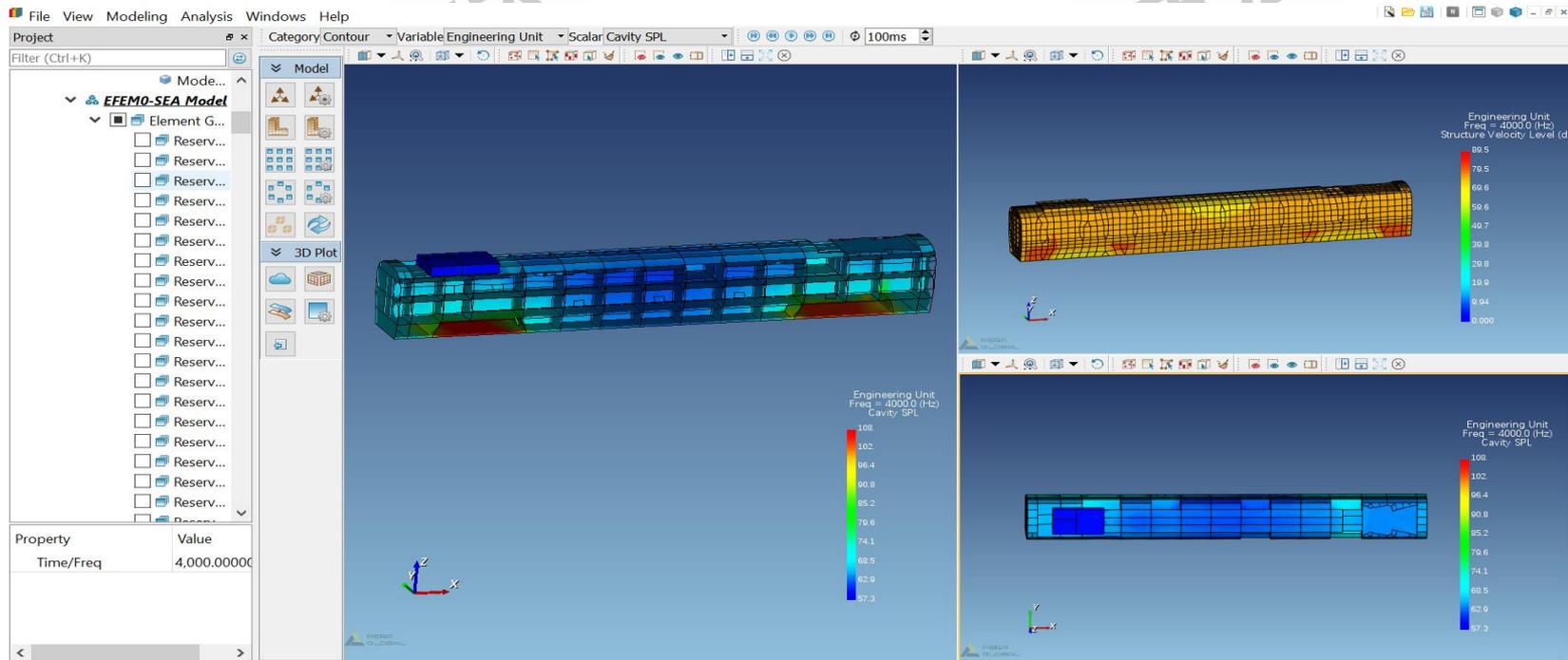
舱室	测试结果(dB(A))	仿真结果(dB(A))	仿真与测试偏差 (dB)
Room-8111	51	53.1	2.1
Room-8112	51	51.8	0.8
Room-8133	48	50.3	2.3
Room-7133	54	52.6	-1.4
Room-7134	54	54.7	0.7
Room-7138	53	57.5	4.5



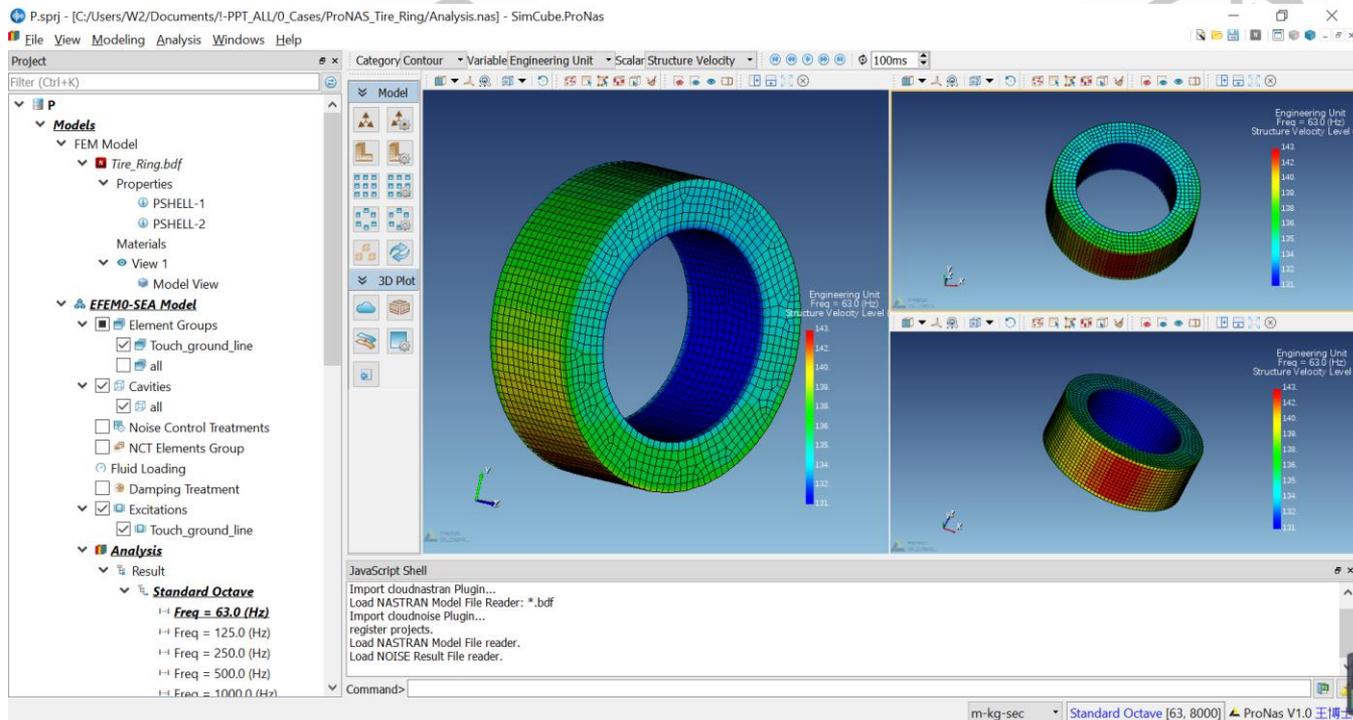
## • ProNas 汽车结构噪声及空气噪声的仿真

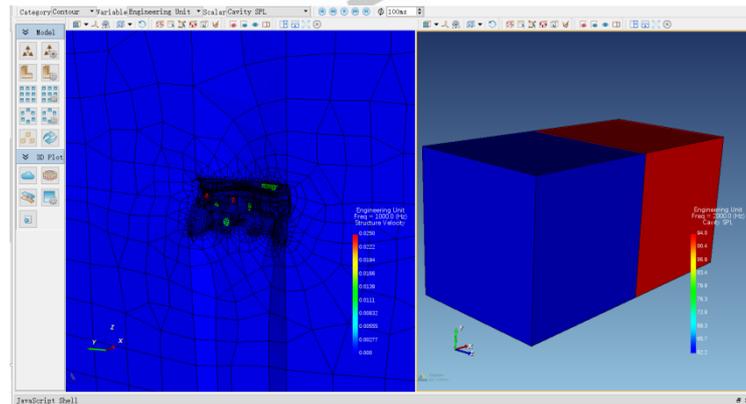
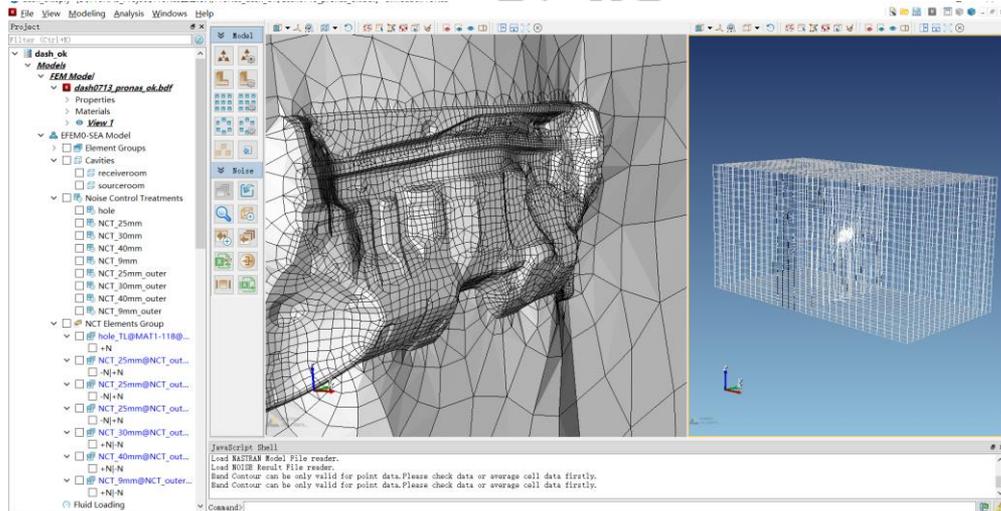


## • ProNas高铁机车车辆空气噪声及结构声学仿真

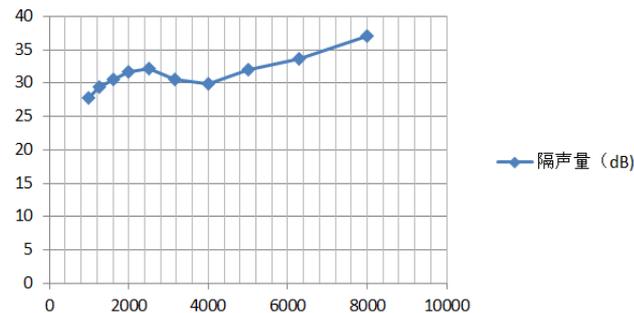


## • ProNas轮胎高频结构声学仿真





隔声量 (dB)



- ProNas 产品研发背景
- ProNas 软件概述及其功能与优势
- ProNas 软件界面及模块
- ProNas 软件计算案例
- ProNas 产品应用领域

- ProNas的应用场合

- 中高频振动噪声分析;
- 噪声预测与控制;

- ProNas的适用行业

- 汽车整车及零部件;
- 航空航天;
- 船舶;
- 铁路机车;
- 通用机械和电子设备;
- 建筑行业;
- 生产设备;
- .....



- ProNas在汽车主机厂的应用;

- 汽车行业对NVH的关注;
- 中高频噪声对NVH的影响;
- 声学包的开发和NVH性能优化

- .....



- ProNas在汽车零部件厂的应用;

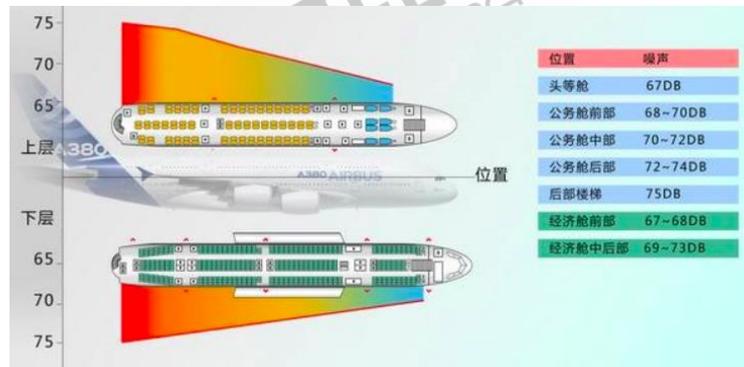
- 对整车NVH影响大的零部件;
- 专门生产消声材料的零部件;



- ProNas在航空航天中的应用；

- 飞行器的内部噪声振动控制分析，辐射噪声预测，新材料及结构设计

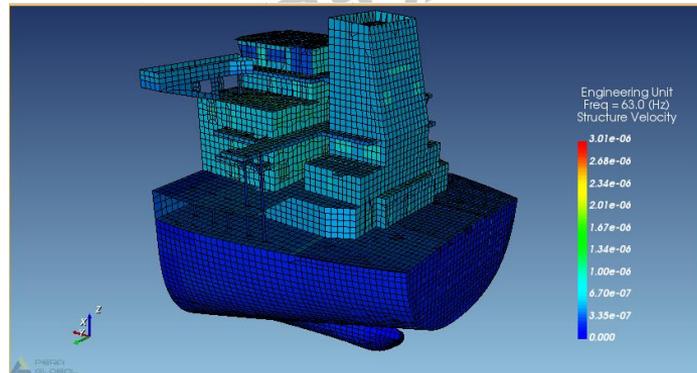
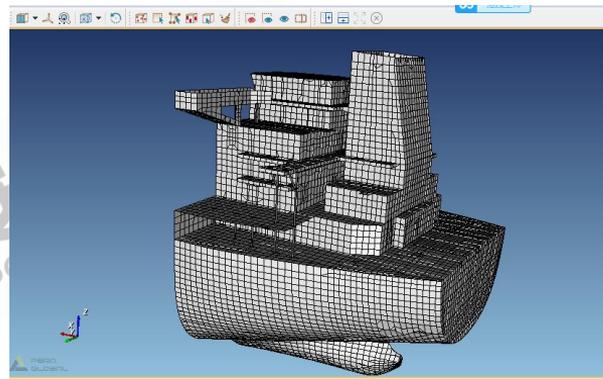
- ✓ 商业、公务和军用飞机内部噪声设计；
    - ✓ 优化新轻质材料和构造的振动 - 声学性能；
    - ✓ 优化噪声控制处理设计来减重并提高燃料效率；
    - ✓ 定义随机振动，声学 and 冲击环境并规定运载火箭和卫星可接受的和限定级别；
    - ✓ 分析主要结构、卫星和关键飞行设备由于声学、随机振动和冲击环境的响应；



## • ProNas在船舶行业的应用;

### - 轮船、游船及舰艇等系统预测水下辐射噪声

- ✓ 创建船舶，潜艇和豪华游艇的系统级噪声和振动模型;
- ✓ 设计降低水力和机械流动对声纳自身噪声的贡献;
- ✓ 将信号噪声辐射降至最小并减少水下噪声辐射。





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

