



IDAJ中国

技术部 魏仁委

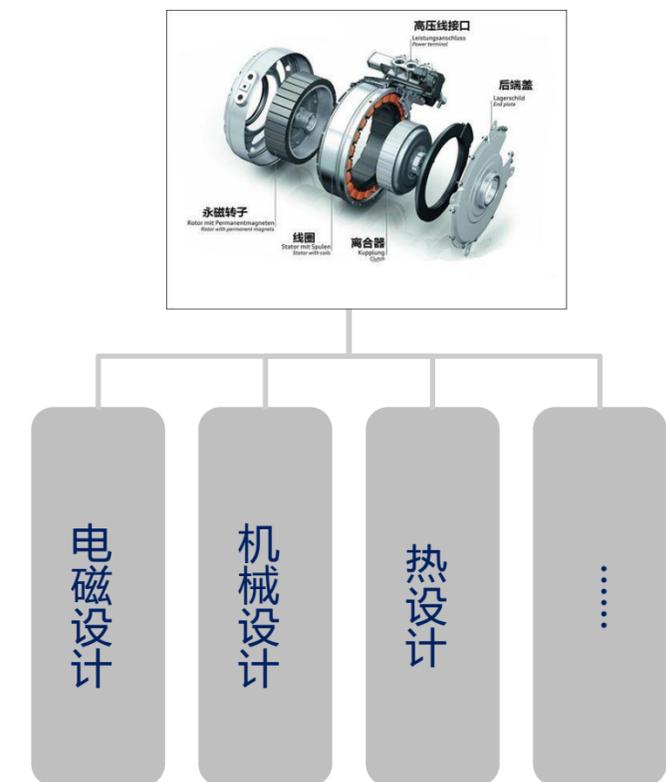
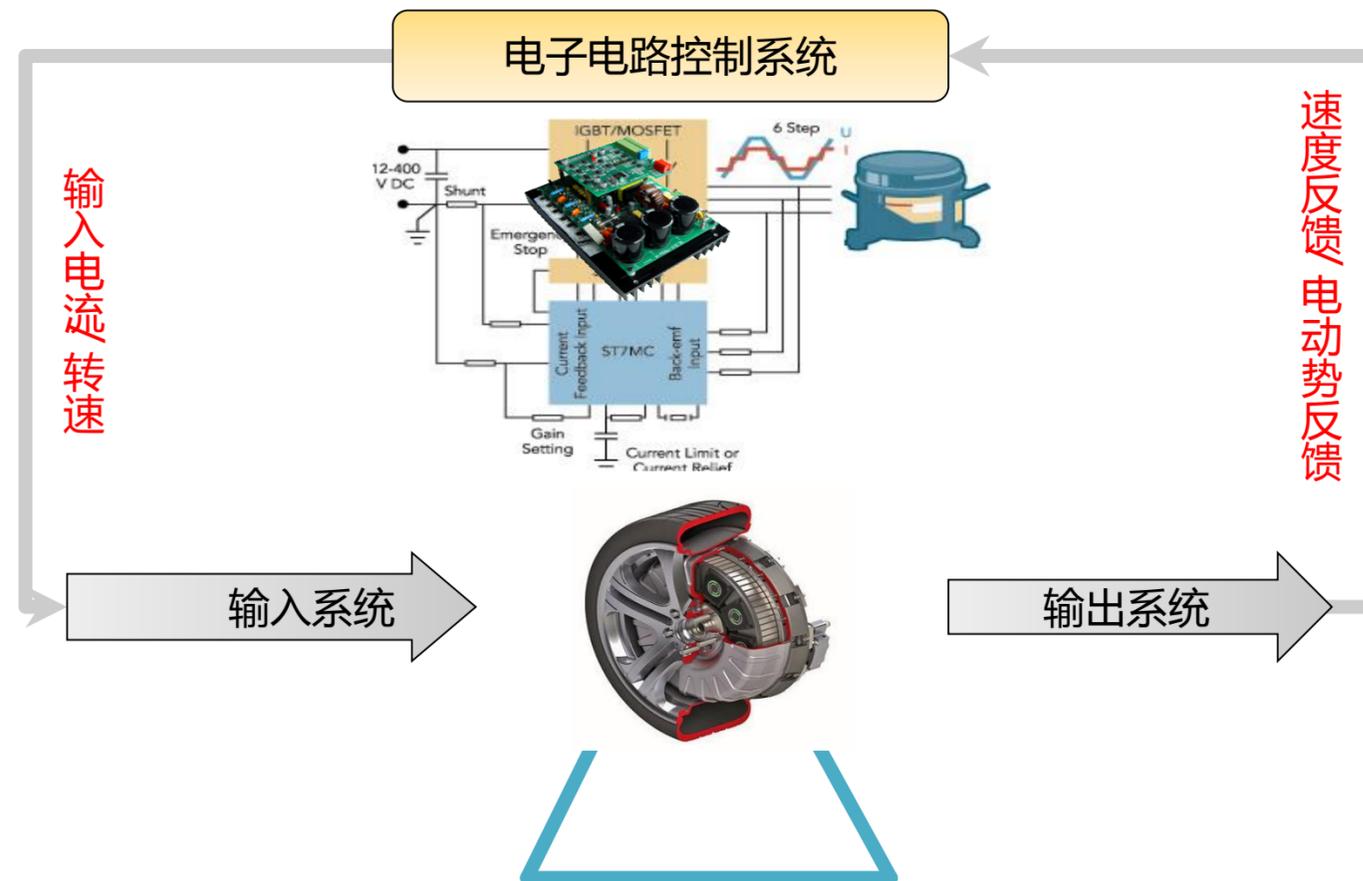
基于Ansys Mechanical的电机多转速工况 的NVH分析

目录

1. 电机的多物理场耦合特性
2. 电磁力的时空特性以及电磁力的传递
3. 基于Ansys Mechanical电机多转速工况的振动噪声分析
 - Mechanical谐响应分析 及电机结构有限建模几个问题
 - Mechanical声学分析(Acoustic)

电机设计中的多物理场问题

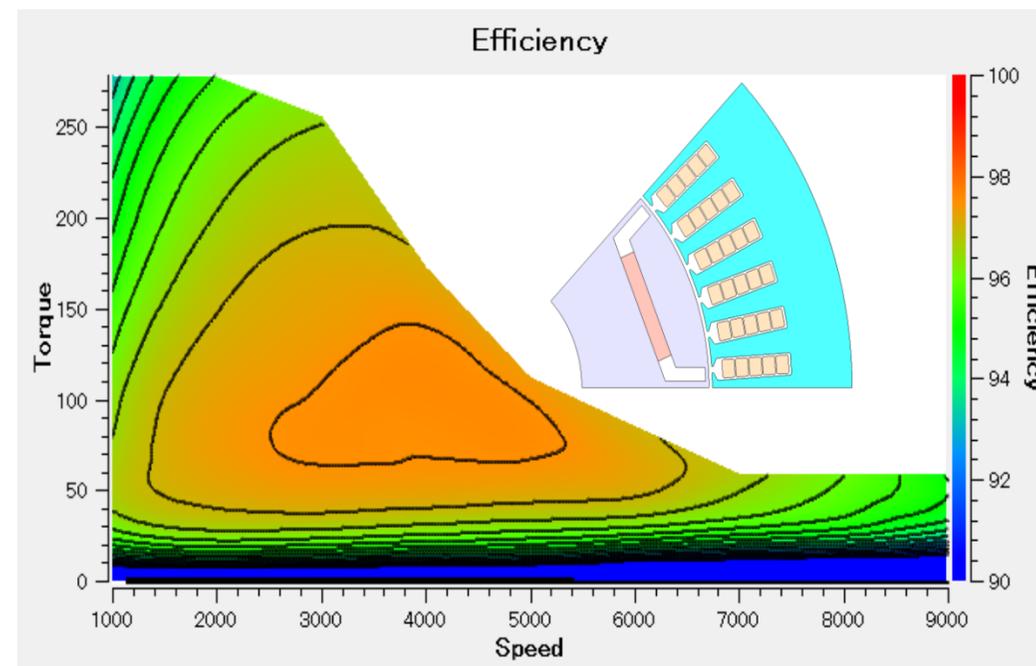
- 电机是一个集机械、散热、电子电路、控制系统等众多学科综合于一体的复杂系统。



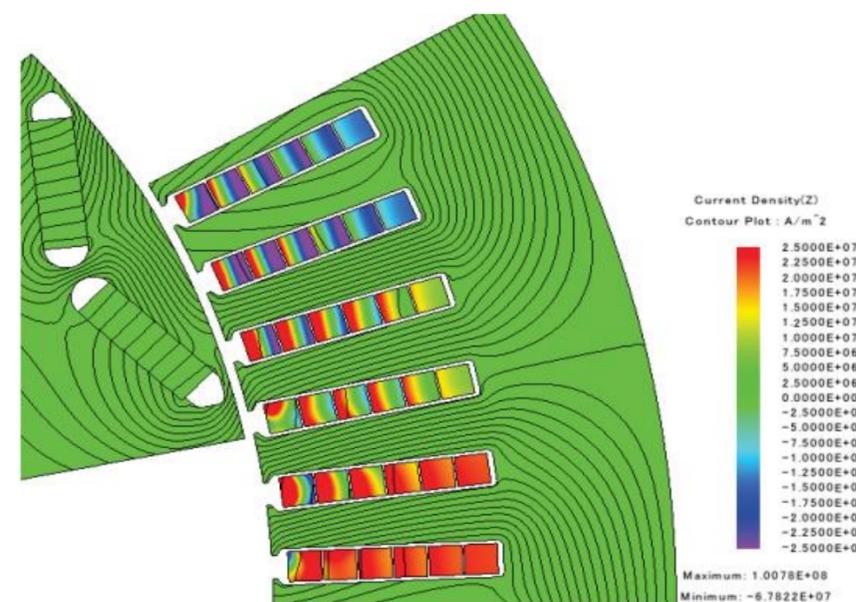
电机设计中的多物理场问题

■ 电机电磁场分析问题

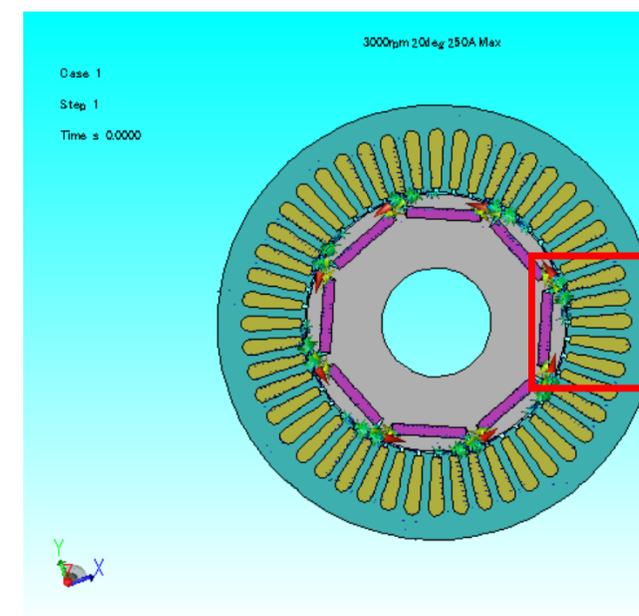
- 电机空间磁密分布、气隙磁密分布
- 电机损耗（铜损、铁损）
- 电机电磁力/力矩计算
- 扁线电机导体的涡流损耗分析
- 电机磁铁的退磁分析
-



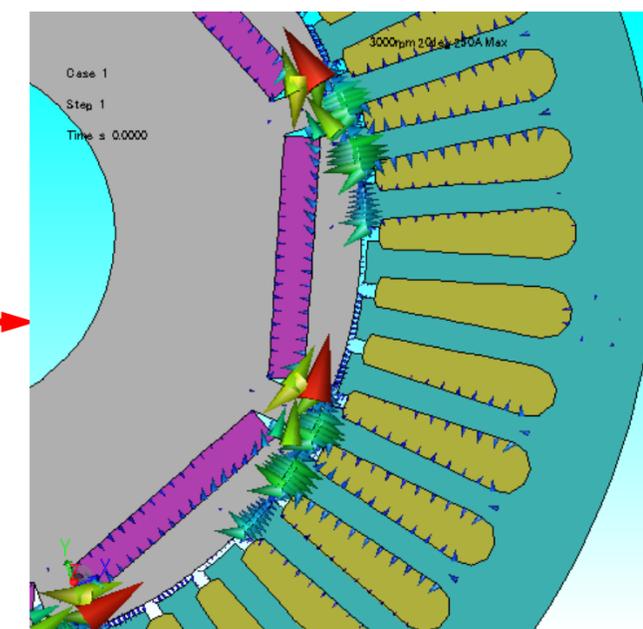
高精度效率图



涡流分布



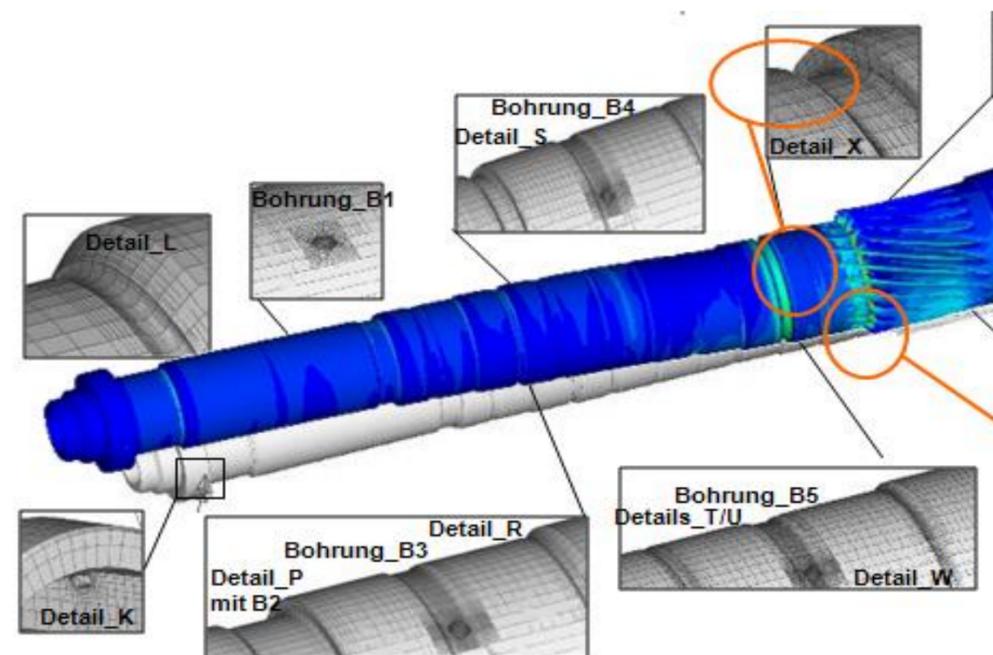
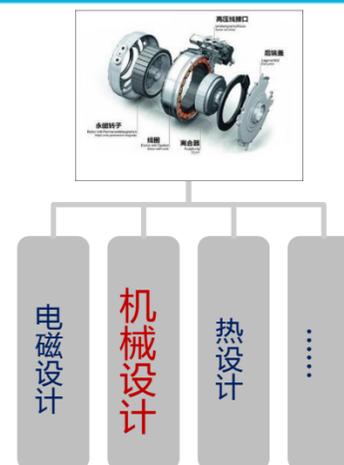
电磁力



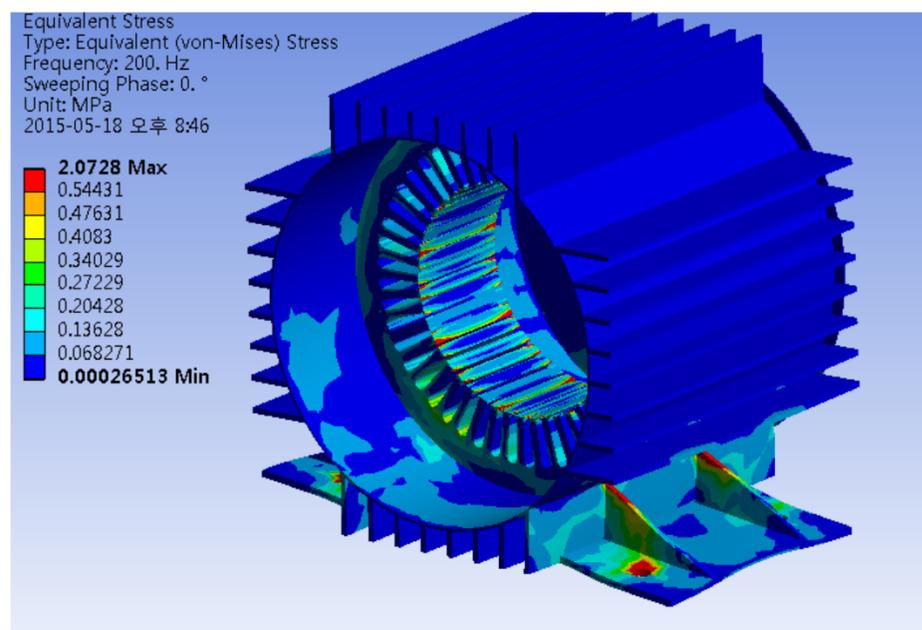
电机设计中的多物理场问题

■ 电机机械结构分析问题

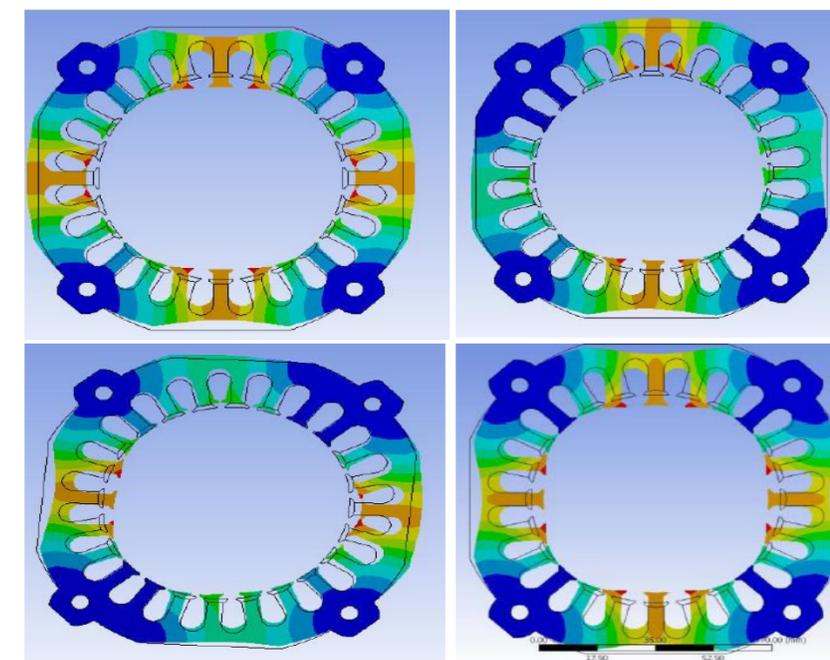
- 定转子\机壳应力和变形
- 定转子、机壳等结构的振动
- 电机装配（过盈配合、螺栓预紧）
- 结构疲劳寿命
-



转子疲劳寿命



定子机壳的应力

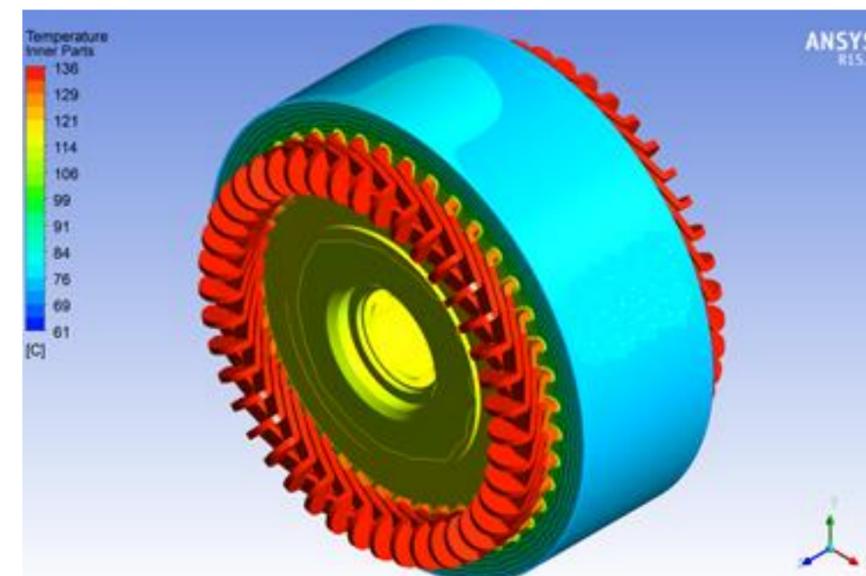
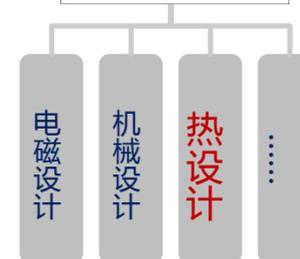


定子固有频率及振型

电机设计中的多物理场问题

■ 电机散热流动分析问题

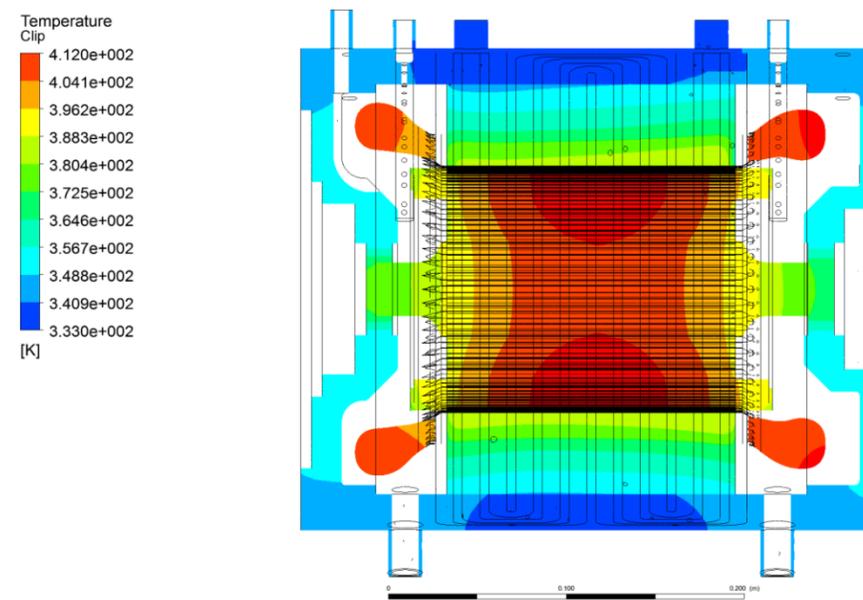
- 冷却系统（风冷、水冷）设计
- 结构传热与流体散热分析
- 电机结构温升(热变形和热应力)
-



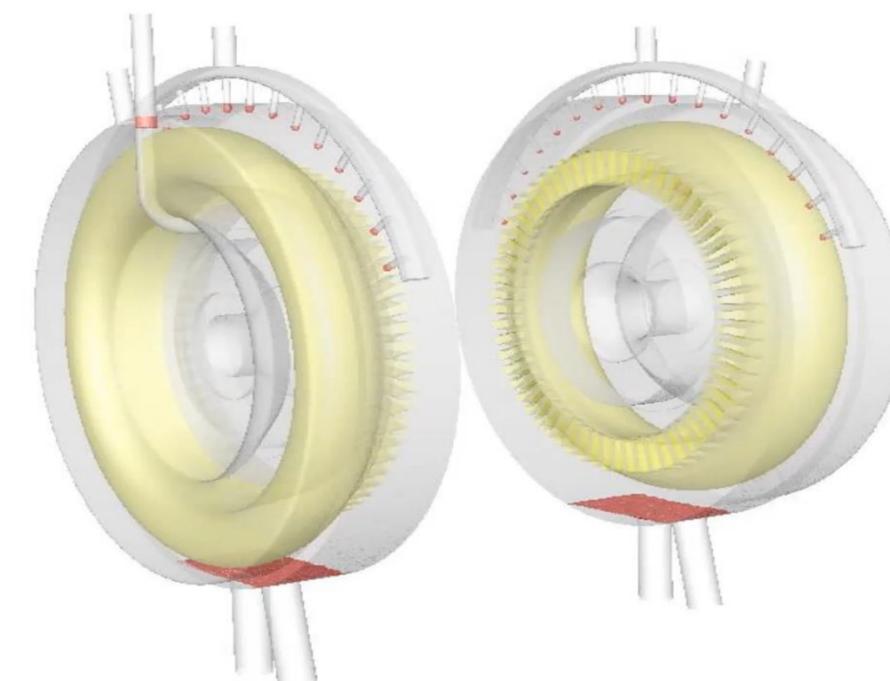
电机结构的温度云图



试验中油的喷射流动 @ 90C



剖面显示电机结构的温度云图



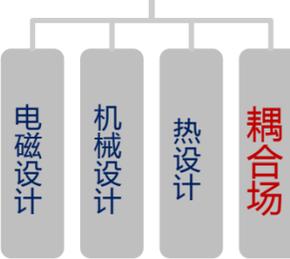
e=5.0000e-03)

绕组端部区域润滑油流动冷却

电机设计中的多物理场问题

■ 电机多物理场耦合分析问题

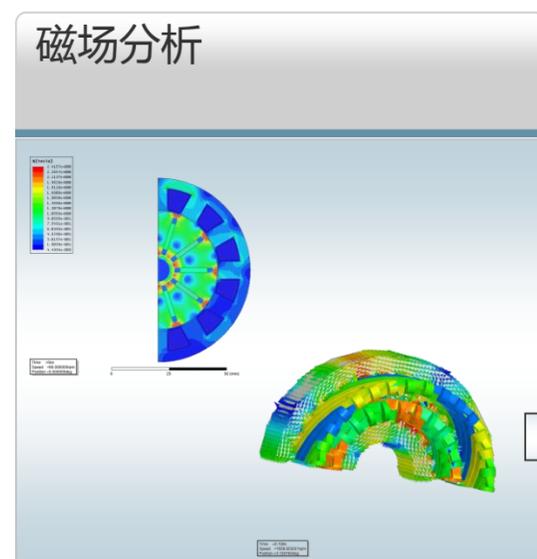
- 电机电磁-结构振动分析
- 电机电磁-温升散热分析
- 电机温升-结构热应力热变形
- **电机电磁-结构振动-噪声分析**
- 电机气动-噪声分析...



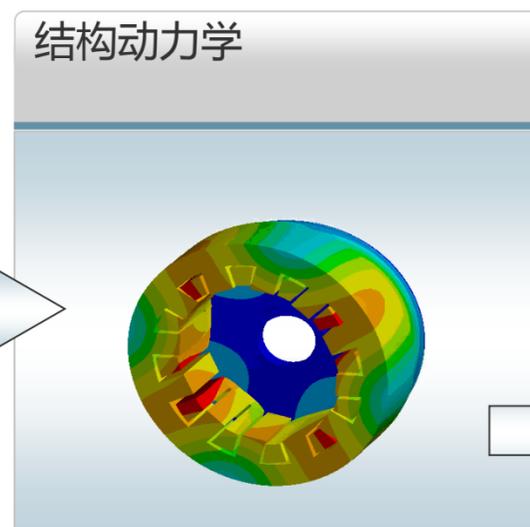
电机NVH性能分析

◆ 电机噪声主要来源

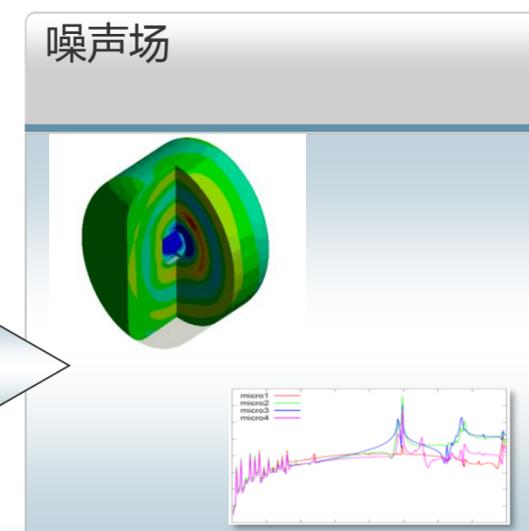
- **电磁力-结构振动噪声**：电磁力和力矩作用在定子和转子上，引起与它们相连接的结构振动，从而产生噪声。
- **机械噪声**：部件传动过程（轴承\转轴等不平衡力）产生的激励，引起结构振动噪声
- **气动噪声**：冷却系统产生的气动噪声（流动噪声），这是由于流体在流动过程中产生的涡流而造成噪声。



力

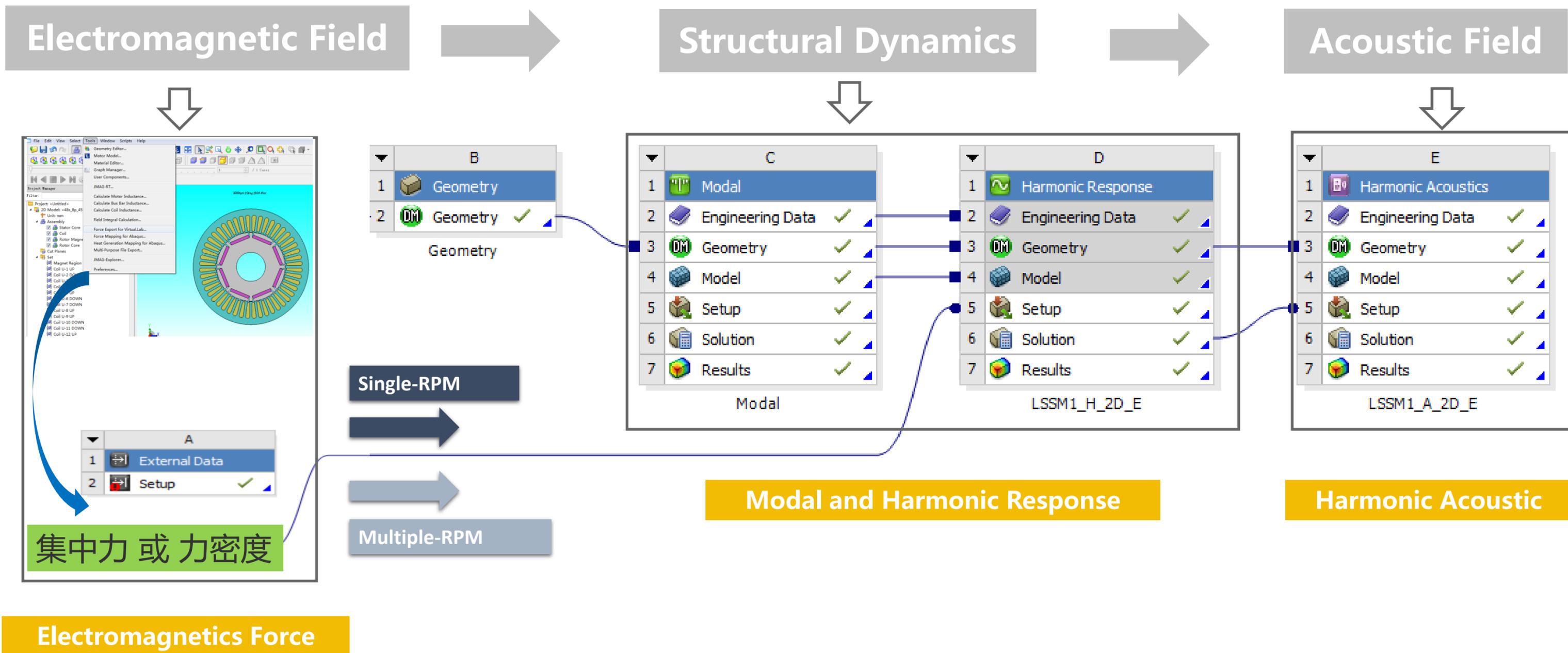


位移



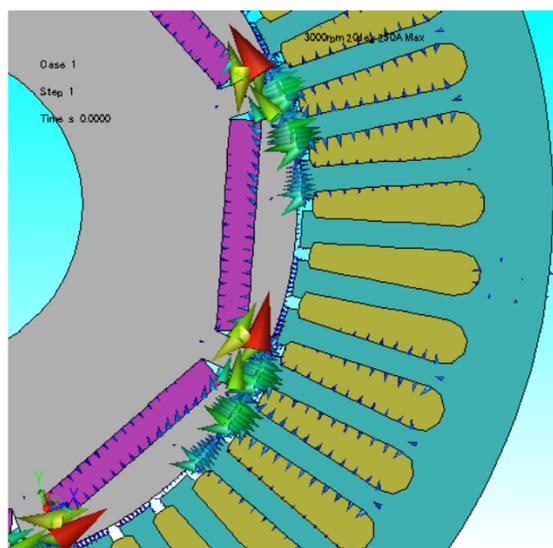
其中电磁噪声机理相对复杂，声品质较差，常表现为高频的啸叫，容易引起人们的不适!

基于Jmag+ Mechanical的 NVH分析流程(电磁-结构振动-噪声)

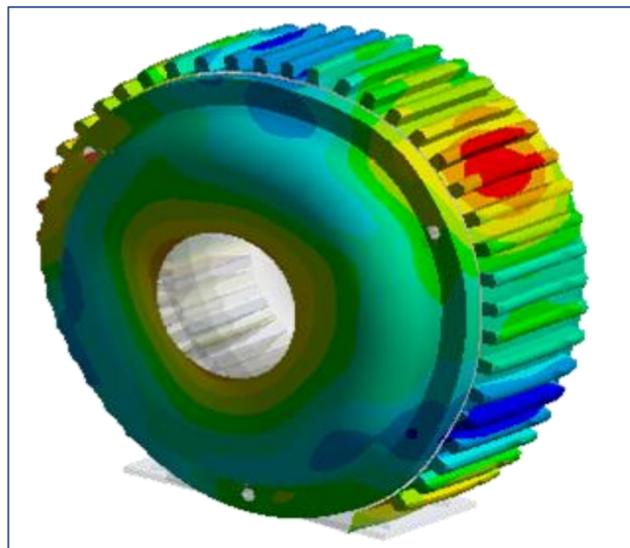


基于Jmag + Ansys Mechanical的 NVH分析流程介绍(续)

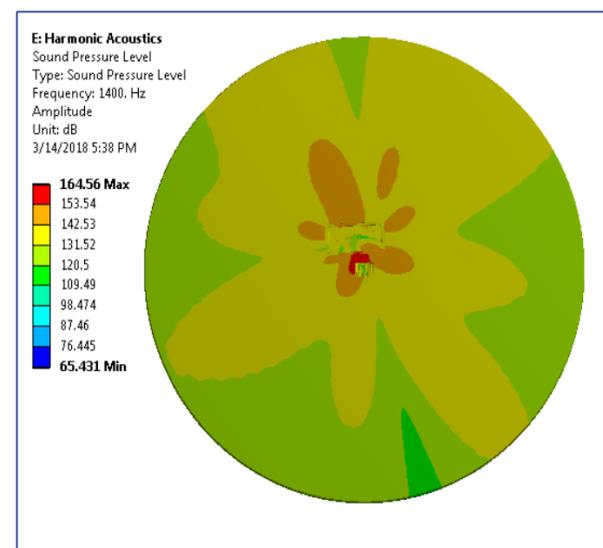
1. Magnetic Field Solution



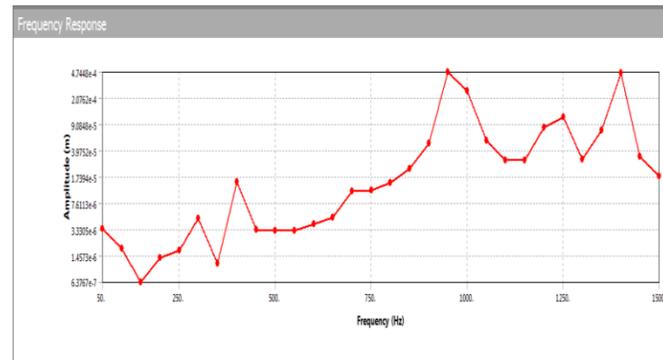
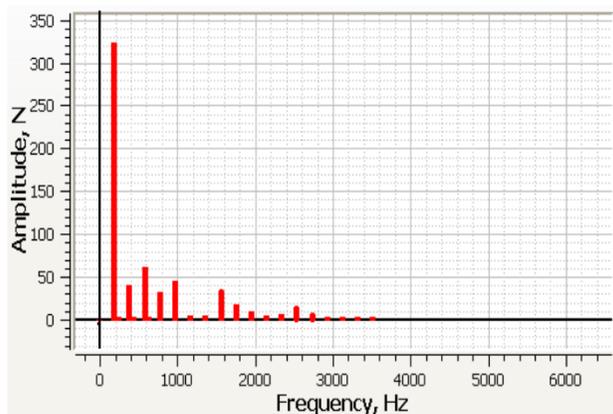
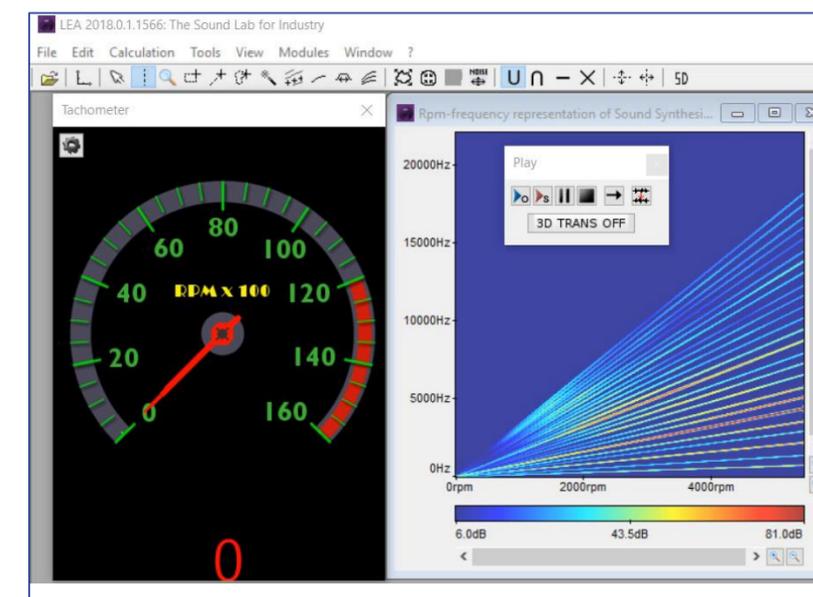
2. Modal and Vibration



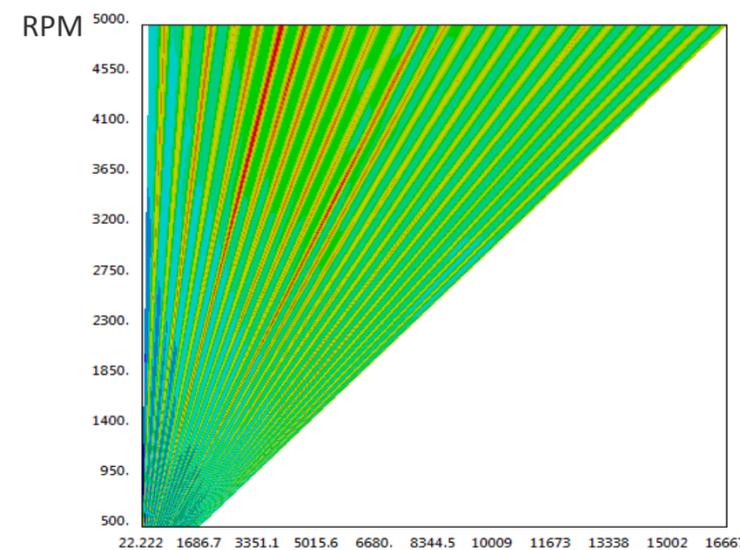
3. Acoustic



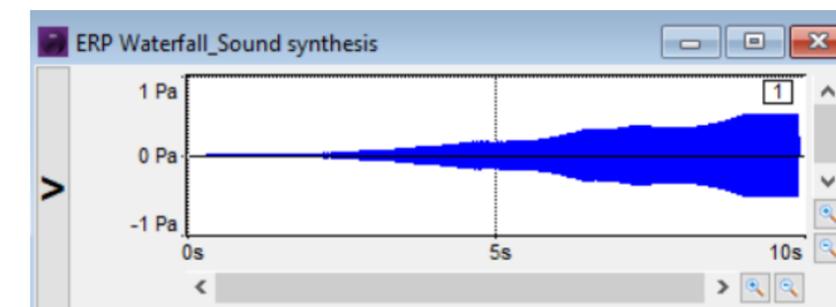
4. Optis VRXP Sound Experience



Frequency [Hz]



Frequency [Hz]

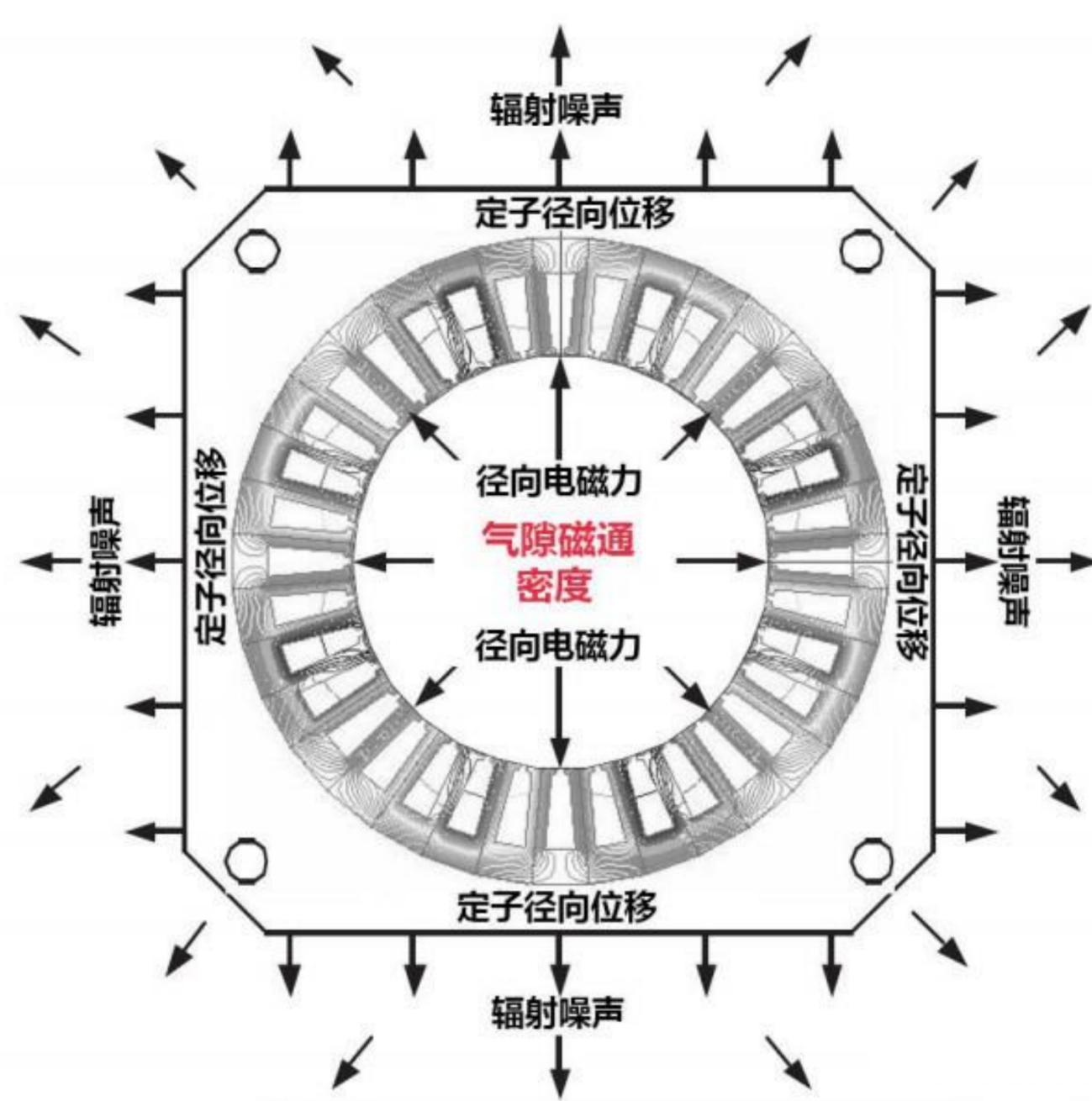


目录

1. 电机的多物理场耦合特性
2. 电磁力的时空特性以及电磁力的传递
3. 基于Ansys Mechanical电机多转速工况的振动噪声分析
 - Mechanical谐响应分析 及电机结构有限建模几个问题
 - Mechanical声学分析(Acoustic)

电机电磁噪声概述

- 电机电磁噪声是由电磁力引起，其中电磁力可以分为麦克斯韦力和磁致伸缩力，一般情况磁致伸缩力的噪声贡献较小；
- 通常将电磁力分为切向力和径向力，切向电磁力一般会导致转矩波动，而径向电磁力会导致定子振动从而向机壳传递振动和向空气辐射噪声。

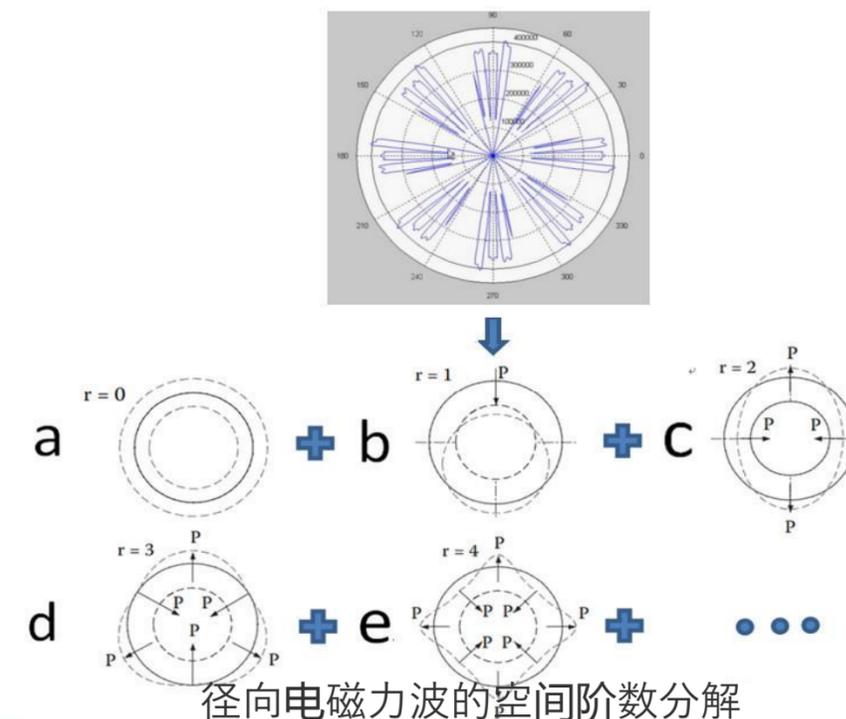
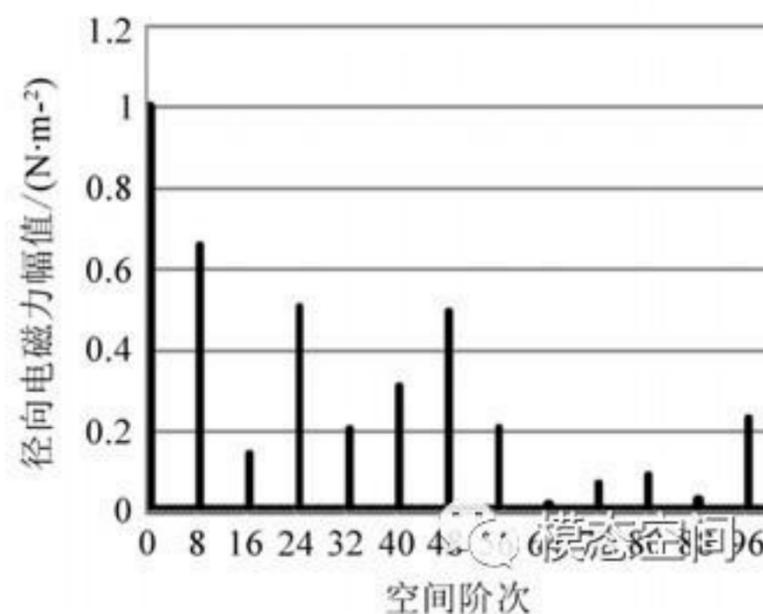
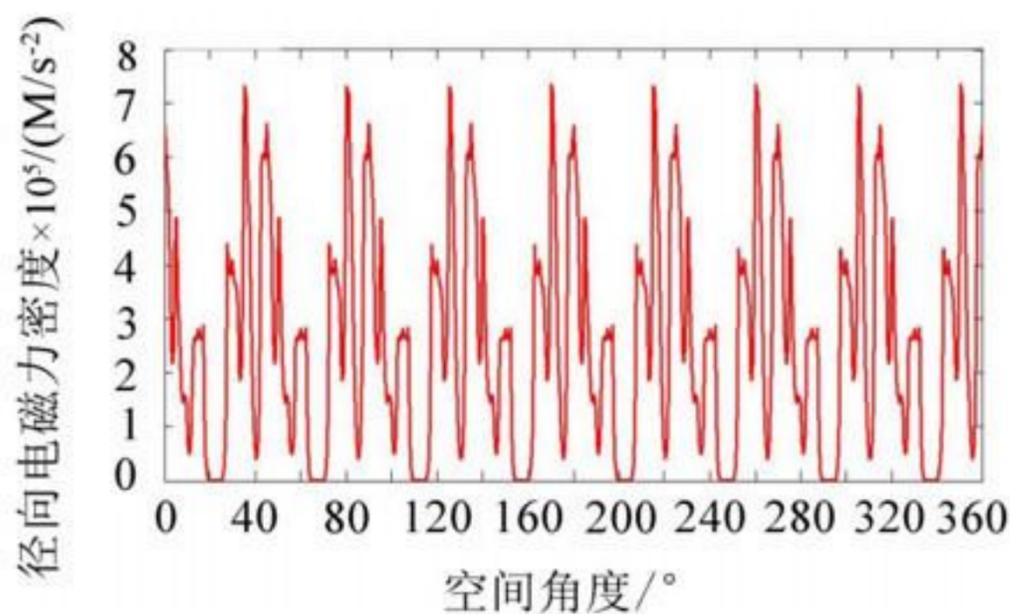


永磁同步电机径向电磁力波

- 气隙磁动势 $f(\theta, t)$ 的谐波组成：气隙磁动势=定子磁动势+转子磁动势；
- 以内置式永磁同步电机为例，其转子表面光滑，只有定子内测开槽，气隙磁导表述为 $\lambda(\theta, t)$
- 当不考虑铁心磁阻饱和的影响，气隙磁密 $b(\theta, t)$ 可以写为磁动势乘以磁导： $b(\theta, t) = f(\theta, t)\lambda(\theta, t)$
- 定子内表面径向单位面积电磁力 $p_n(\theta, t)$ 的表达式： $p_n(\theta, t) \approx b^2(\theta, t)/2\mu_0$ ——（显然这会得到一个很长的表达式，里面包含了所有产生径向电磁力的项（基波磁场作用、定子谐波磁场作用、转子谐波作用、定转子谐波磁场相互作用等一系列产生径向电磁力的元素））。
- 因为大量的谐波磁动势和存在周期变化分量的磁导作用，产生了存在大量谐波的磁场，这些磁场单独或相互作用产生了一系列的径向电磁力波，正是这些随时间和空间变化的径向电磁力波，导致了定子的振动，从而产生噪声。

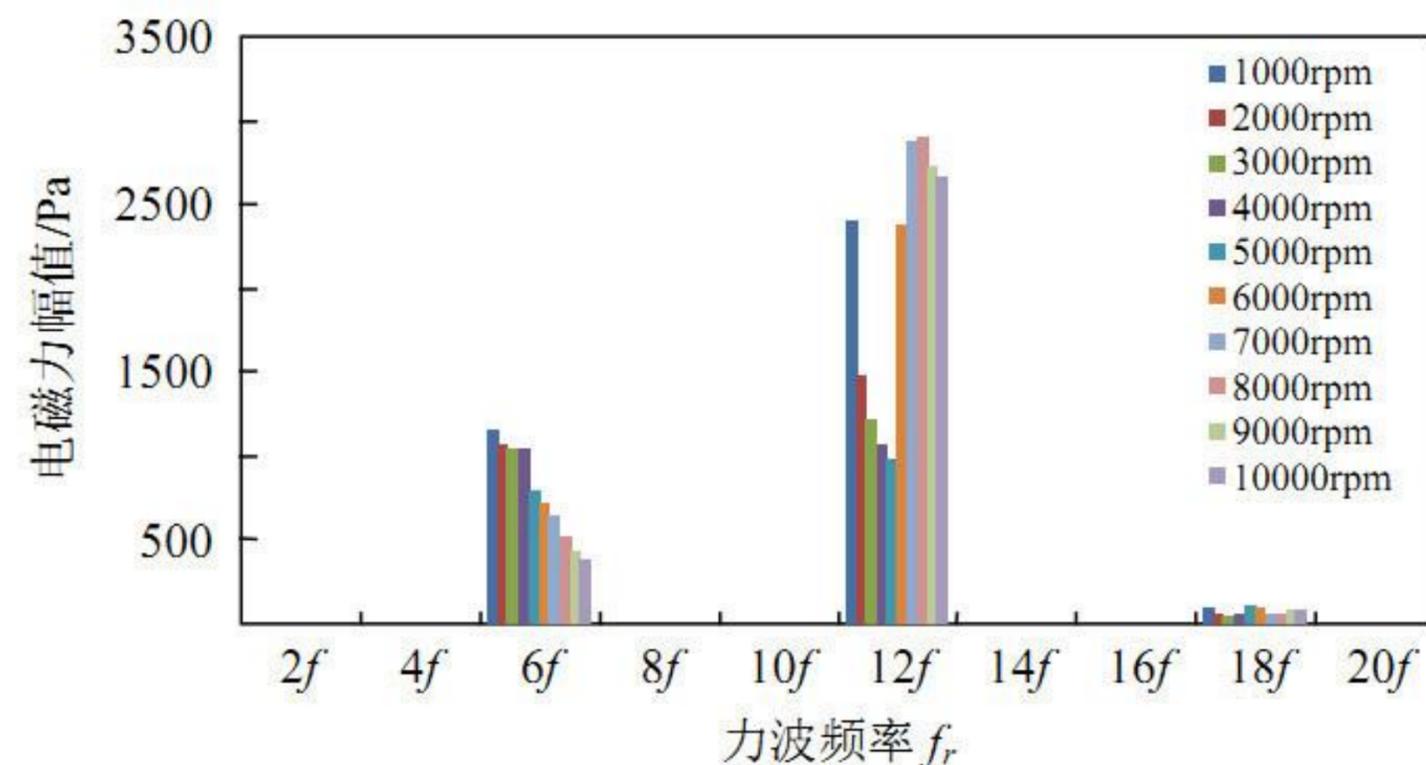
径向电磁力波的时空特性

- 径向电磁力波既是时间的函数又是空间的函数，这里就将引出两个特别重要的特性：**空间阶数**和**时间频率**。
- 我们经常会在电磁场仿真软件中提取电机某一时刻的气隙的径向电磁力数据（这里是指某一时刻，也就是此时仅仅考虑的是径向电磁力随空间的分布，而没有考虑随时间的变化），得到其沿着电机机械角度的一个分布；可以发现气隙径向电磁力在空间圆周上的分布似乎有一定的周期性，此时借助我们的傅立叶分解的数学工具，就可以将其分解得到一系列的空间频率，这里称之为**空间阶数**。
- 将分解后得到的各次谐波在圆周上画出，便是我们一般意义上的空间阶数力波的类型，也称之为“力型”，我们按照瓣数定义空间径向电磁力波的阶数，0瓣为0阶，1瓣为1阶，2瓣为2阶，如此类推，容易理解。



径向电磁力波的时空特性

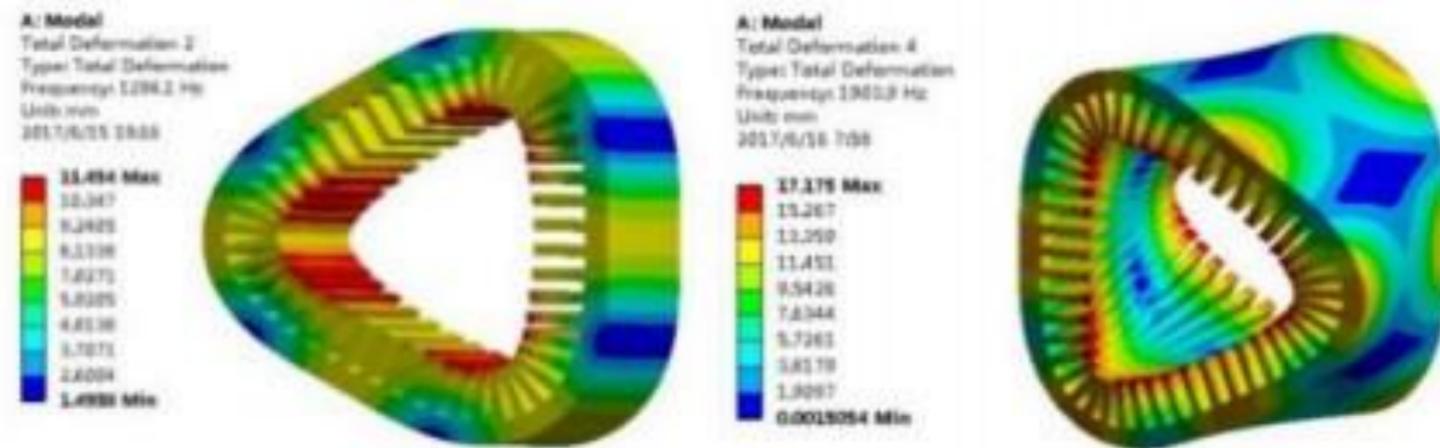
- 接下来再看径向电磁力波的时间频率特性。可以按照不同空间阶数的径向电磁力波分开来讨论，因为这些电磁力波的空间阶数特征并不会随时间而改变。
- 随时间变化径向电磁力波在气隙中各点的幅值会按照一定的规律在变化，这个变化是时间维度上的，分解到各个空间阶数的径向电磁力波上，不同阶数的力波其随时间变化的频率特征是不一样的，就是我们应该要重点关注的。不同阶数力波其随时间变化的频率特征取决于其力波的形成来源。我们当然又可以通过傅立叶分解这个工具，得到某一阶数的径向空间力波随时间变化的频率特征。如图所示，为某永磁同步电机0阶力波在各转速工况下的频率分布特征。



为某永磁同步电机0阶力波在各转速工况下的频率分布特征

定子结构的振动特性(模态特性)

- 对于车用永磁同步电机定子振动噪声分析，我们一般采用 (m,n) 来定义定子的模态阶数（其中 m 为轴向模态阶数、 n 为径向模态阶数）。
- 定子的轴向一致模态是对电磁振动噪声贡献较大的，因此工程上经常只考虑 $m=0$ 的情况（定子沿轴向振动同相位），若考虑较为细致，也会考虑当 $m=1$ 时的情况（定子轴向两端振动反相位），轴向更高阶的模态相比于径向模态对定子径向电磁力致振动噪声贡献会非常小，在工程上可以忽略不计。
- 下图为定子径向3阶、轴向0阶模态（轴向同相位振动）；与定子径向3阶、轴向1阶模态（轴向反相位振动）；对于径向电磁力致振动噪声而言， $(0,3)$ 阶模态会比 $(1,3)$ 阶模态的贡献大得多。



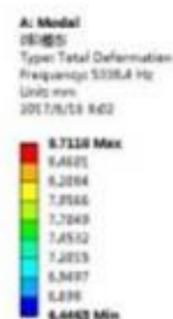
(c) $(m,n)=(0,3)$ 1294Hz

(d) $(m,n)=(1,3)$

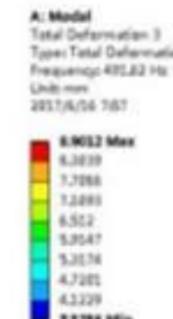
定子的轴向同相位振动模态和轴向反相位振动模态

定子结构的振动特性(模态特性)

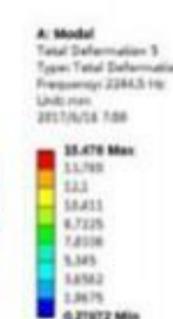
- 对于径向电磁力致振动噪声而言，轴向阶数为0，径向振动阶数低的模态是我们关注的重点。
- 如右图：定子径向0阶模态振型和空间0次电磁力波形状相似、定子径向1阶模态振型和空间1次电磁力波形状相似、定子径向2阶模态振型和空间2次电磁力波形状相似，依次类推，容易理解。如右图所示的定子径向0阶、2阶、4阶模态（分别与空间0次、2次、4次电磁力波形状对应），这和我们一般模态分析时候按照频率从小到大的阶数定义要加以区别。



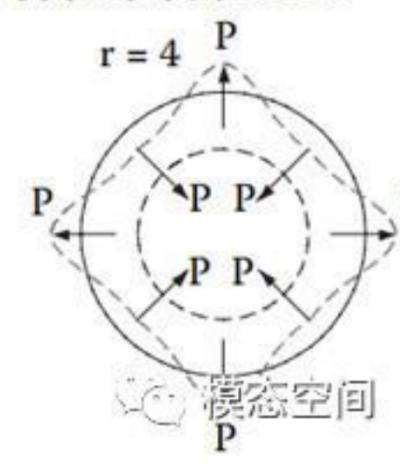
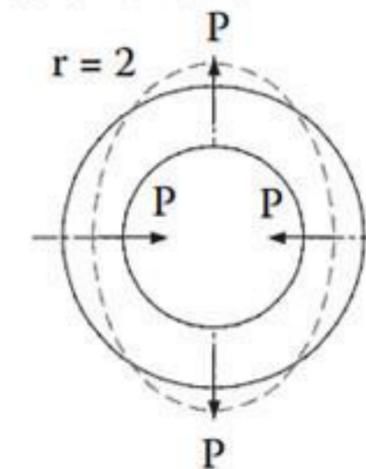
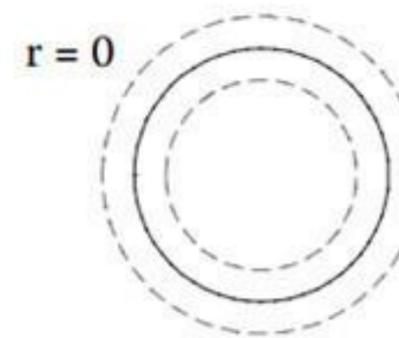
(g) $(m,n)=(0,0)$ 5338Hz



(a) $(m,n)=(0,2)$ 492Hz



(e) $(m,n)=(0,4)$ 2245Hz



模态空间

径向电磁力波的时空特性

- 前面解释了径向电磁力的空间阶数，那么问题来了，我们为什么要关注径向电磁力波的空间阶数呢，简单说两点：
- 仅考虑定子结构的径向模态而言，**定子结构的变形量与径向激励力阶数的四次方成反比**：考虑到这个特性，这意味着我们前面推出来径向电磁力波的那么长一串表达式中，我们对于力波阶数高且幅值小的就可以忽略不考虑了；事实上我们一般只需关注阶数低、幅值大的径向电磁力波，这大大缩小了我们“关注”谐波的范围。一般来说定子和转子谐波磁场相互作用会产生阶数低、幅值大的电磁力波，是我们重点关注的对象。
- 仅考虑定子结构的径向模态而言，径向电磁力波要导致定子共振有两个条件需满足：第1是我们所谓的“力型”和定子径向的模态振型要接近或一致（特别注意这里说的是径向模态振型）。第2就是径向电磁力波的频率要和对应结构径向模态振型的模态频率接近或者一致。

径向电磁力波导致定子共振条件

- 第1便是：所谓“力型”和定子的径向模态振型要接近或一致，即径向力波的空间阶数和定子径向模态振型阶数一致。
- 第2就是：该阶径向电磁力波频率成分要和对应阶数模态振型的模态频率接近或者一致。
- 所以在NVH性能开发时要充分考虑“避型”和“避频”，但是随着我们驱动电机转速范围越来越宽，避免共振变得越来越困难，所以从源头上的电磁谐波的削弱与消除值得我们好好关注。

电机阶次本质

- 电机本质上也是一种旋转机械，对于旋转机械的噪声源诊断就不得不提到阶次分析了。这里所说的阶次和上面所说的空间阶数和模态阶数可有着很大的区别。**阶次本质**上是旋转机械每转一圈，特定事件发生的次数。
- 驱动电机有时候的工况是转速一直在变化的，譬如WOT（全油门加速）工况，单从振动或噪声的频谱信号，很难发掘足够的规律，此时我们就要借助阶次来进行诊断了，阶次分析可以帮助发掘出特征频率和转速之间的关系。

- ✓ 频率f：每秒特定事件发生的次数；
- ✓ 转频：每秒转过的圈数（ rps ） = $n/60$
- ✓ 转速n：每分钟转过的圈数（ rpm ）
- ✓ 阶次O：每转一圈特定事件发生的次数
=（频率：每秒特定事件发生的次数）/（转频：每秒转过的圈数）

根据电机原理推导的电磁力波的特征频率，以定子 ν 次谐波磁场和转子 μ 次谐波磁场相互作用产生的小于4次的力波为例：其次数可以表述为： $\gamma = \mu + \nu$ ，其力波频率为 $2k f_0$ ；又由变频调速永磁同步电机的电流基频和转速关系知： $f_0 = np/60$ ；那么定子 ν 次谐波磁场和转子 μ 次谐波磁场相互作用产生的小于4次的空间电磁力波其阶次特征为：

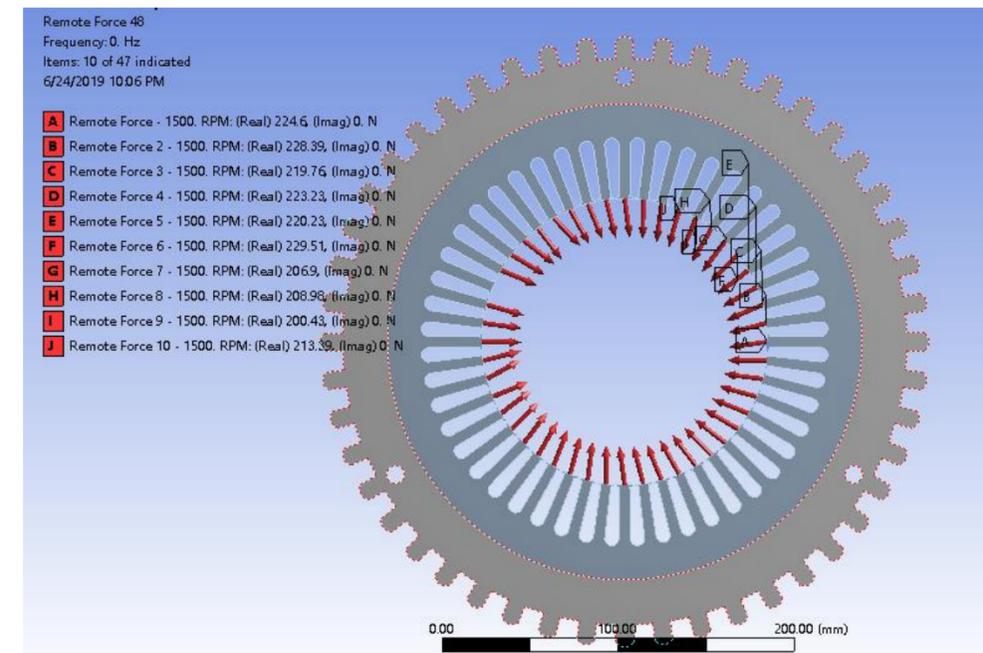
$$\text{阶次 } O = \frac{\text{频率}}{\text{转频}} = \frac{2knp}{60} * \frac{60}{n} = 2kp$$

如果其极对数 $P=3$ ，根据我们上面的推导：6、12、18、24、30、36、42、48、54、60等2KP阶次噪声其来源就很有可能是我们上述的定子谐波磁场和转子谐波磁场的相互作用产生。

Jmag To Mechanical的电磁力的传递方式

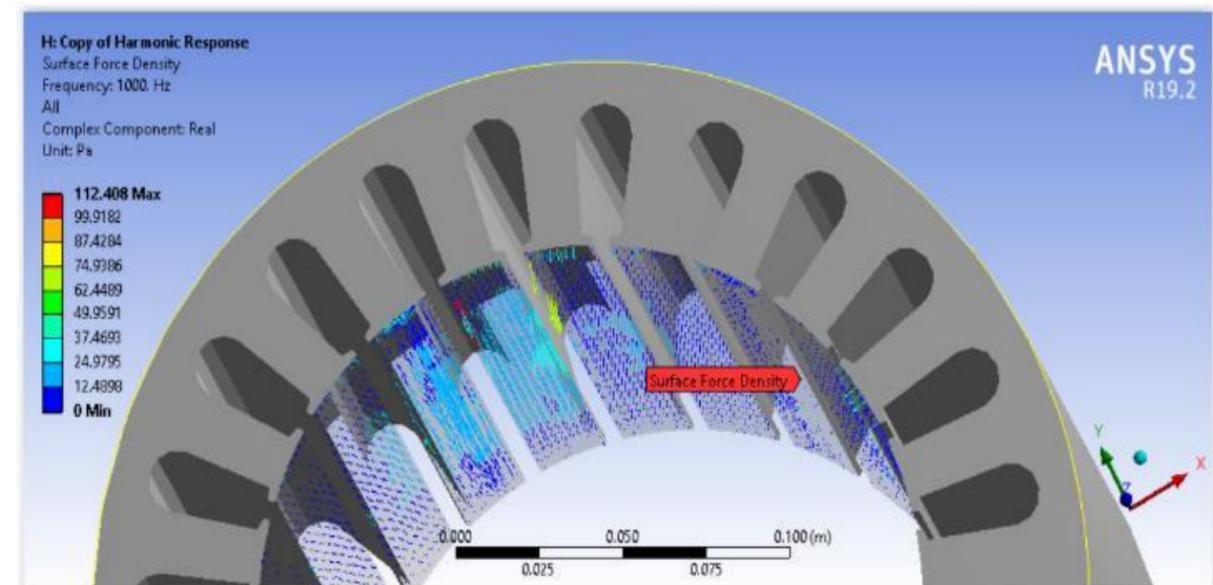
1、集中力方式：

Jmag计算输出定子每个齿部的电磁力的合力，在Mechanical中对应的齿上施加相应的集中力。



2、力密度的方式：

Jmag计算输出定子整个齿部的电磁力密度（.CSV文件），在Mechanical将该文件映射到结构模型的定子齿部上；以压力的方式进行施加。



Context: B : Harmonic Response - Mechanical [ANSYS Mechanical Premium]

File Home Environment Display Selection Automation

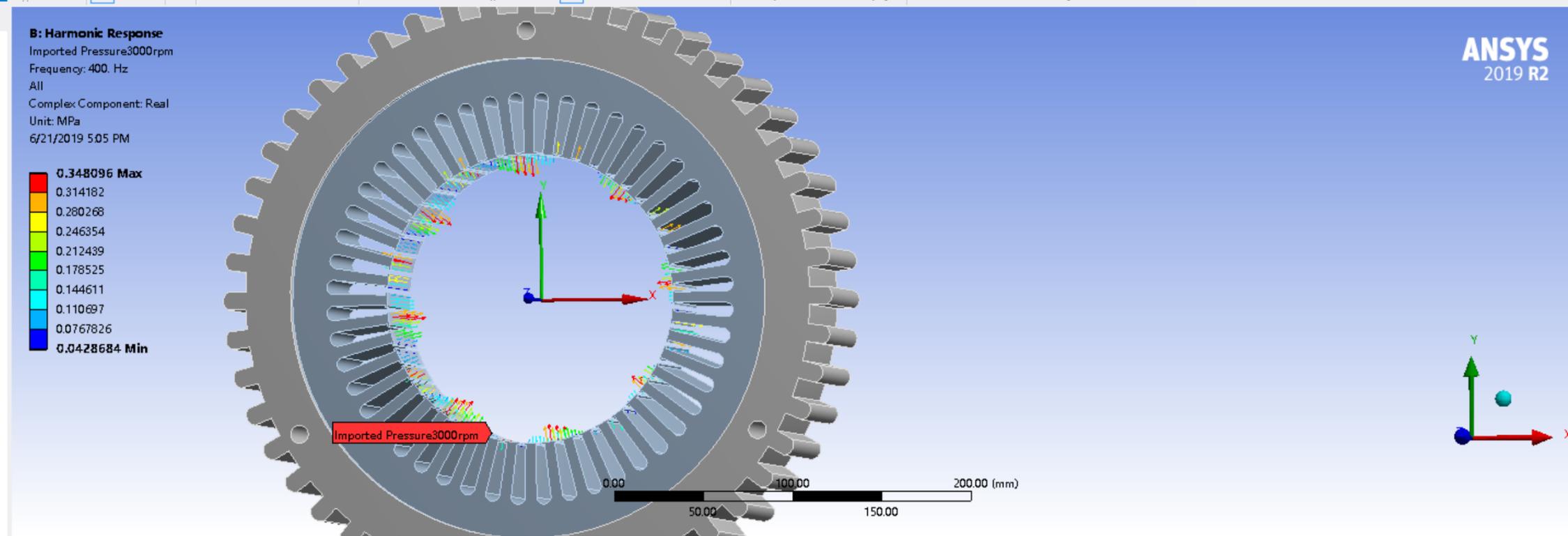
Quick Launch

Duplicate Outline Solve Solvers Analysis Coordinate System Commands Chart Section Plane Annotation Loads Force Pressure Supports Fixed Displacement Conditions Direct FE Temperature Radiation Convection Validation Write Input File... Export Nastran File Worksheet Graph Tabular Data

Outline

Name Search Outline

- Project*
 - Model (B3)
 - Geometry
 - Materials
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh
 - Named Selections
 - Harmonic Response (B4)
 - Pre-Stress/Modal (None)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Commands (APDL)
 - Imported Load (F2)
 - Imported Pressure 1500rpm
 - Imported Pressure 2000rpm
 - Imported Pressure 2500rpm
 - Imported Pressure 3000rpm
 - Imported Pressure 3500rpm
 - Imported Pressure 4000rpm
 - Imported Pressure 4500rpm
 - Imported Pressure 5000rpm
 - Imported Pressure 5500rpm
 - Imported Pressure 6000rpm
 - Solution (B5)
 - Solution Information
 - ERP Level Waterfall Diagram



Details of "Imported Pressure3000rpm"

Scope

Scoping Method	Named Selection
Named Selection	ABC

Definition

Type	Imported Pressure
Apply To	Elements
Tabular Loading	Program Controlled
Suppressed	No
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System

Graphics Controls

By	Active Row
Active Row	5
Complex Component	Real
Component	All
Display Source Points	Off
Display Source Point Ids	Off

Reta Options (Beta)

Details Section Planes

Data View

Imported Pressure3000rpm

	X Component [Real] (MPa)	X Component [Imag] (MPa)	Y Component [Real] (MPa)	Y Component [Imag] (MPa)	Z Component [Real] (MPa)	Z Component [Imag] (MPa)	Analysis Frequency (Hz)	Scale [Real]	Offset [Real]
1	File4:Pressure1	File4:Pressure4	File4:Pressure2	File4:Pressure5	File4:Pressure3	File4:Pressure6	0	1	0
2	File4:Pressure7	File4:Pressure10	File4:Pressure8	File4:Pressure11	File4:Pressure9	File4:Pressure12	100	1	0
3	File4:Pressure13	File4:Pressure16	File4:Pressure14	File4:Pressure17	File4:Pressure15	File4:Pressure18	200	1	0
4	File4:Pressure19	File4:Pressure22	File4:Pressure20	File4:Pressure23	File4:Pressure21	File4:Pressure24	300	1	0
5	File4:Pressure25	File4:Pressure28	File4:Pressure26	File4:Pressure29	File4:Pressure27	File4:Pressure30	400	1	0
6	File4:Pressure31	File4:Pressure34	File4:Pressure32	File4:Pressure35	File4:Pressure33	File4:Pressure36	500	1	0
7	File4:Pressure37	File4:Pressure40	File4:Pressure38	File4:Pressure41	File4:Pressure39	File4:Pressure42	600	1	0
8	File4:Pressure43	File4:Pressure46	File4:Pressure44	File4:Pressure47	File4:Pressure45	File4:Pressure48	700	1	0
9	File4:Pressure49	File4:Pressure52	File4:Pressure50	File4:Pressure53	File4:Pressure51	File4:Pressure54	800	1	0
10	File4:Pressure55	File4:Pressure58	File4:Pressure56	File4:Pressure59	File4:Pressure57	File4:Pressure60	900	1	0
11	File4:Pressure61	File4:Pressure64	File4:Pressure62	File4:Pressure65	File4:Pressure63	File4:Pressure66	1000	1	0

Outline

Name Search Outline

- Materials
- Coordinate Systems
- Connections
- Mesh
- Named Selections
- Harmonic Response (B4)**
 - Pre-Stress/Modal (None)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Commands (APDL)
 - Imported Load (F2)
 - Imported Pressure 1500rpm
 - Imported Pressure 2000rpm
 - Imported Pressure 2500rpm
 - Imported Pressure 3000rpm
 - Imported Pressure 3500rpm
 - Imported Pressure 4000rpm
 - Imported Pressure 4500rpm
 - Imported Pressure 5000rpm
 - Imported Pressure 5500rpm
 - Imported Pressure 6000rpm
- Solution (B5)**
 - Solution Information
 - ERP Level Waterfall Diagram

Worksheet

ERP Level Waterfall Diagram

RPM Value (RPM)

6000.

5437.5

4875.

4312.5

3750.

3187.5

2625.

2062.5

1500.

Frequency (Hz)

50. 1243.8 2437.5 3631.3 4825. 6018.8 7212.5 8406.3 9600.

86.441

70.793

60.68

50.567

40.453

30.34

20.227

10.113

0.

-54.391

Equivalent Radiated Power Level [dB]

Probe Delete Lower Band Upper Band 70.793

Apply Band(s)

Details of "ERP Level Waterfall Diagram"

Scope

Scoping Method: Named Selection

Named Selection: ASI-1

Definition

Type: ERP Level Waterfall Diagram

Suppressed: No

Results

Minimum: -54.391 dB

Maximum: 86.441 dB

Graph

[dB]

[Hz]

Tabular Data

	Frequency [Hz]	<input checked="" type="checkbox"/> RPM Value [rpm]	<input checked="" type="checkbox"/> Eq
1	50.	1500.	-49.13
2	100.	1500.	-52.18
3	150.	1500.	-44.00
4	200.	1500.	42.744
5	250.	1500.	-33.46
6	300.	1500.	-39.79
7	350.	1500.	-33.09
8	400.	1500.	30.574
9	450.	1500.	-30.33
10	500.	1500.	37.00

目录

1. 电机的多物理场耦合特性
2. 电磁力的时空特性以及电磁力的传递
3. 基于Ansys Mechanical电机多转速工况的振动噪声分析
 - Mechanical谐响应分析 及电机结构有限建模几个问题
 - Mechanical声学分析(Acoustic)

FEA动力学分析基本概念

■静力学分析

- 静态分析(Static Structure)

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{F}\}$$

■动力学分析

- **模态分析(Modal)**
- **谐响应分析(Harmonic Response)**
- 瞬态动力学分析(Transient Structural)
- 响应谱分析(Response Spectrum)
- 随机振动分析(Random Vibration)
- 显式动力学分析(Explicit Dynamics)

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{F}\}$$

Ansys Worchbench中对应的各个分析类型

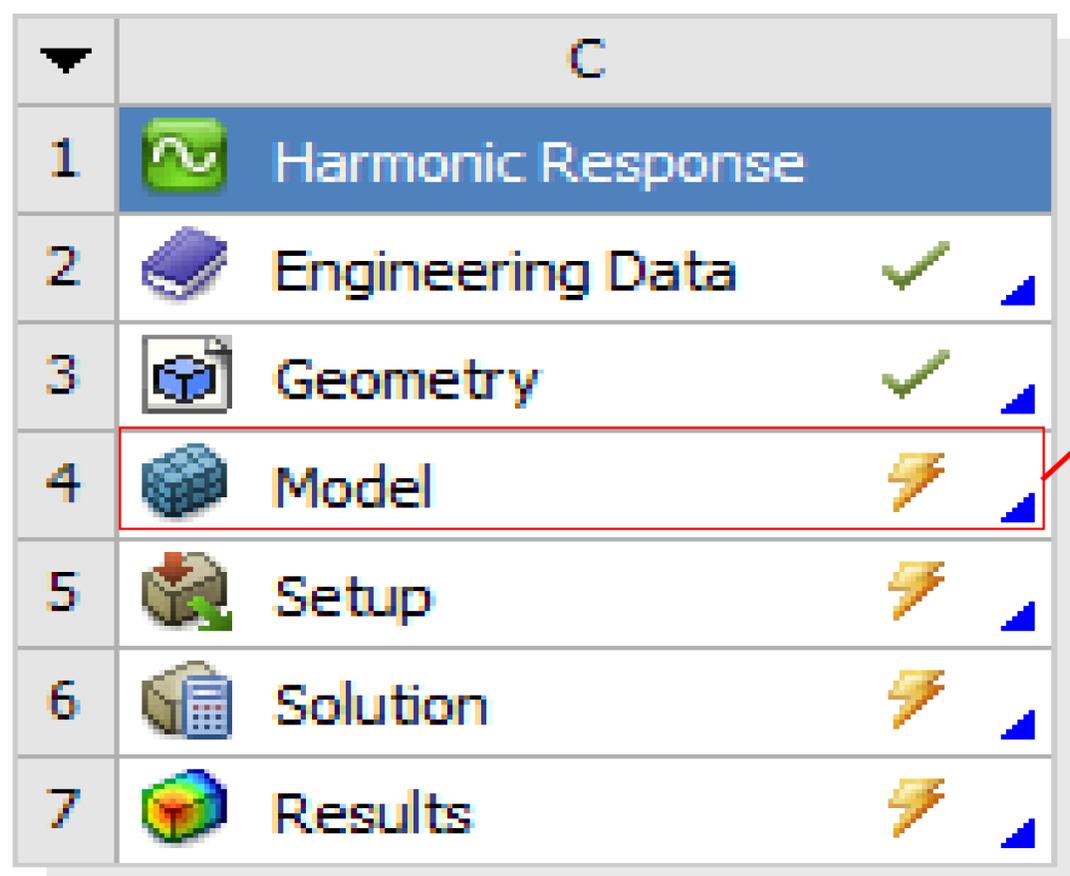
The image displays the Ansys Workbench interface. On the left, the 'Toolbox' is divided into 'Analysis Systems' and 'Component Systems'. The 'Analysis Systems' list includes: Explicit Dynamics, Harmonic Acoustics, Harmonic Response, Modal, Random Vibration, Response Spectrum, Static Structural, Steady-State Thermal, Topology Optimization, Transient Structural, and Transient Thermal. A red box highlights the first seven items, with a red arrow pointing to the 'Project Schematic' area.

The 'Project Schematic' area shows seven analysis types, each with a numbered list of components:

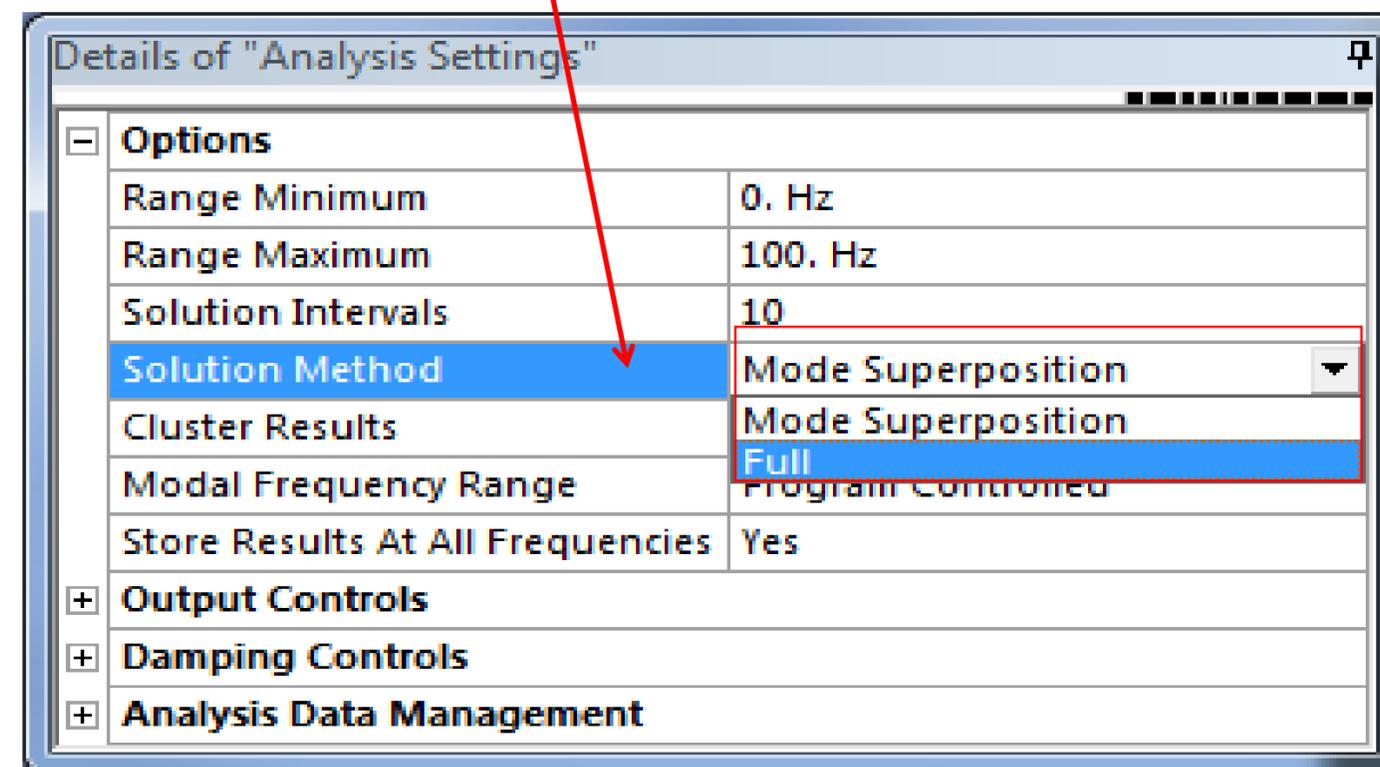
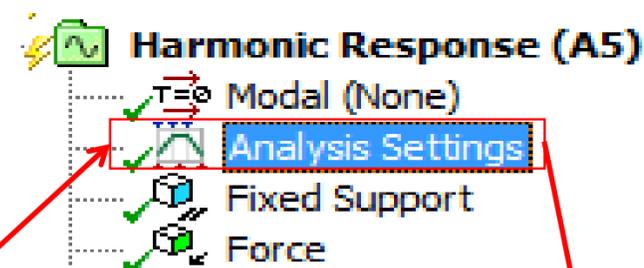
- A Static Structural:** 1. Static Structural, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.
- B Modal:** 1. Modal, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.
- C Harmonic Response:** 1. Harmonic Response, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.
- D Transient Structural:** 1. Transient Structural, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.
- E Response Spectrum:** 1. Response Spectrum, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.
- F Random Vibration:** 1. Random Vibration, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.
- G Explicit Dynamics:** 1. Explicit Dynamics, 2. Engineering Data (checked), 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, 7. Results.

Mechanical谐响应分析的两种算法

➤ Analysis Setting > Solution Method



Full Harmonic Response



Mechanical谐响应分析的两种算法

完全法FULL

- 精确求解
- 相对MSUP求解速度较慢
- 支持所有荷载和边界条件
- 求解点均匀分布在频率范围
- 采用稀疏矩阵求解器求解复数形式的联立方程

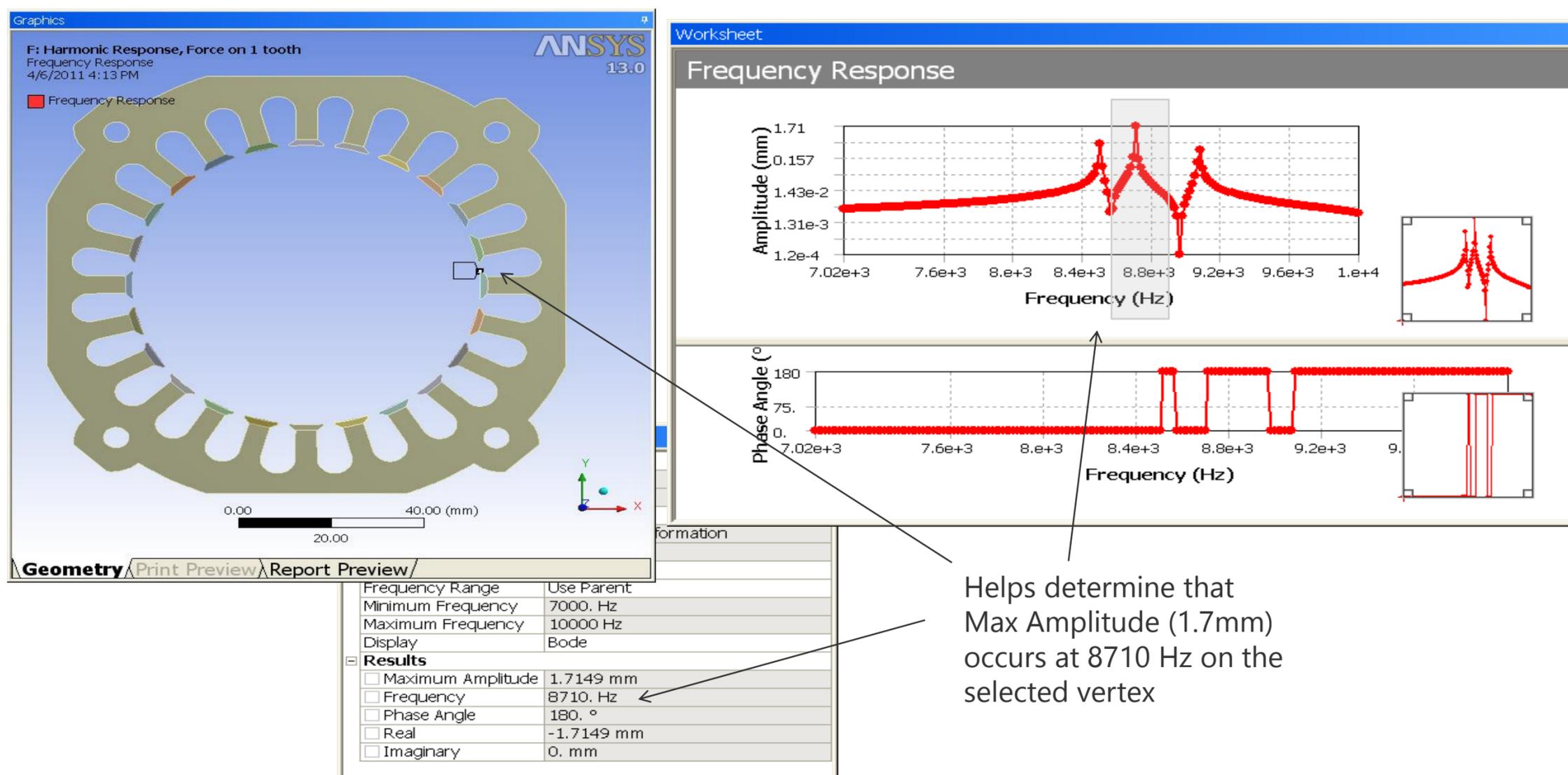
模态叠加法MSUP

- 近似求解；精度部分取决于模态提取数目相对谐响应是否足够
- 相对FULL求解更快
- 不支持非零的简谐位移
- 求解点在频率范围可以均匀分布，也可以相对集中分布
- 通过正交向量的线性组合求解解耦方程

Mechanical谐响应分析的两算法

➤ 谐响应分析结果后处理

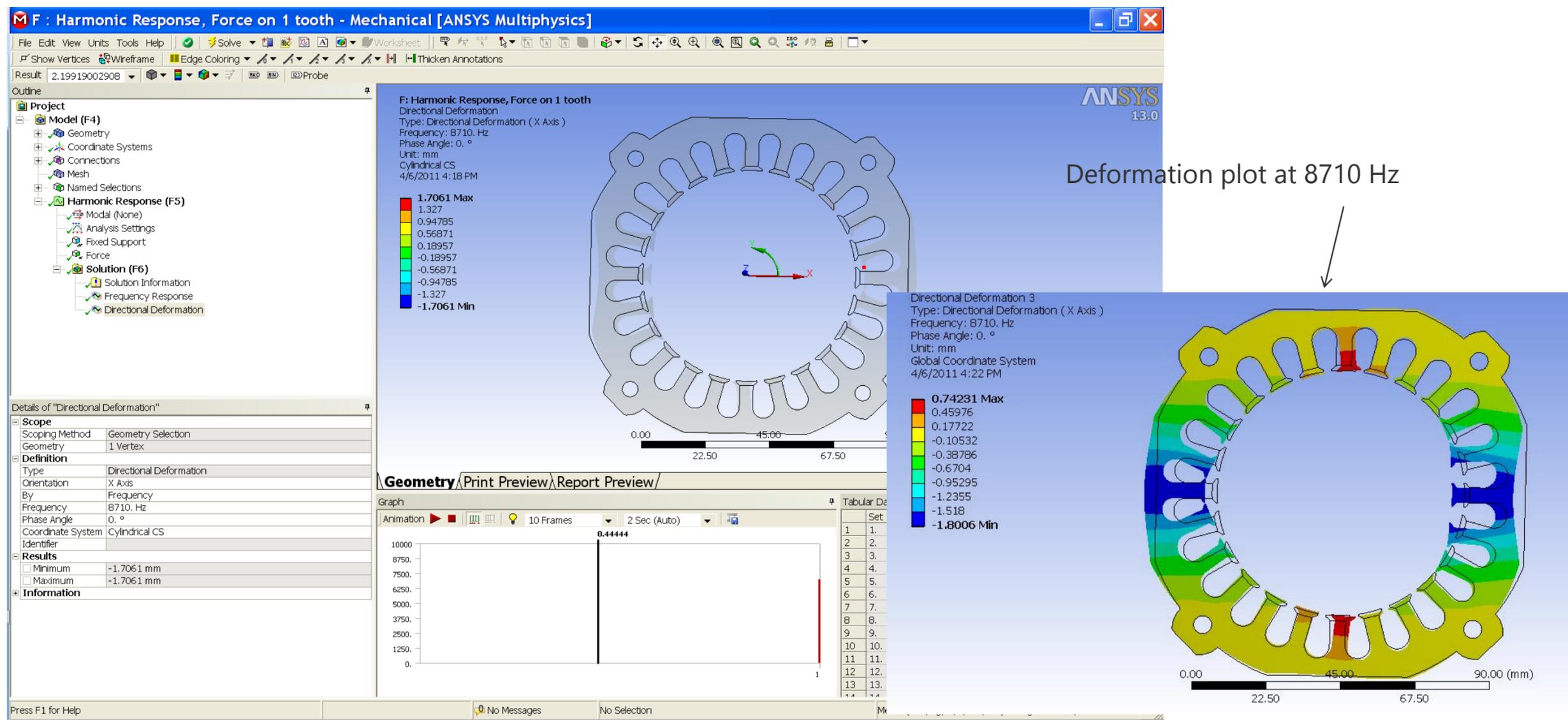
比如：绘制某一节点位置的频率响应曲线（振幅和相位）



Mechanical谐响应分析的两算法

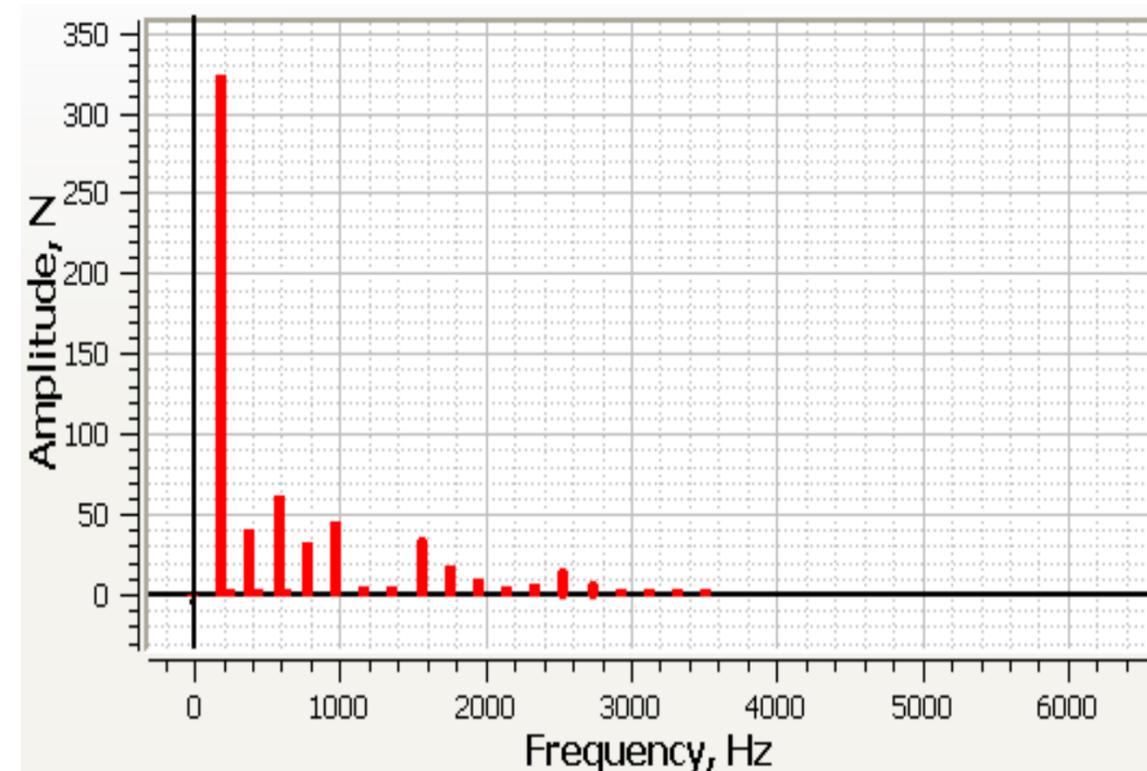
➤ 谐响应分析结果后处理

比如：查看某一特定频率的位移振幅结果



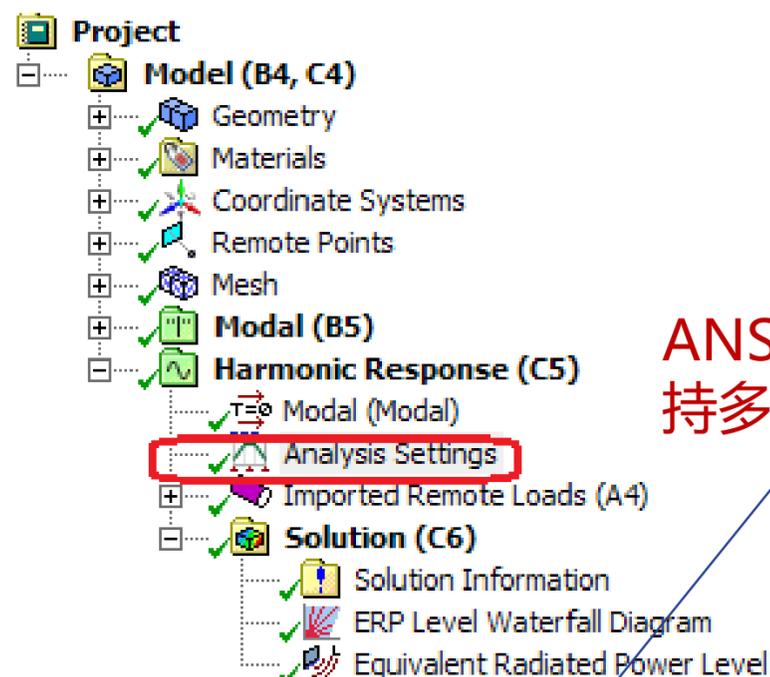
Mechanical中设置多转速点工况MRPs

- 通常进行谐响应分析时，默认是只有一个Step分析的。
- 比如将某个转速下的电磁力——通常已对时域的电磁力进行了离散傅立叶变换DFT，获得了频率下的电磁力载荷（幅值/相位角 或实部/虚部）。该载荷可以采用一个Step谐响应即可完成。
- 为了后处理能生成振动声场结果的瀑布图，即要实现一个转速范围内的电磁力作用下的结构谐振分析；首先是对该转速范围进行离散，离散成多个转速工况；将各个转速工况频率形式的电磁力都导入进Mechanical中，此时必须采用多个Step进行定义，不同Step代表不同转速的载荷工况。



Mechanical中设置多转速点工况MRPs

➤ Analysis Settings中的相关设置。



ANSYS 2019R1 新功能：支持多个转速工况点载荷的导入

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Multiple RPMs	Yes
Number Of RPMs	4
Current RPM Number	4
RPM Value	6000. RPM
RPM Frequency Spacing	Linear
RPM Frequency Range Minimum	0. Hz
RPM Frequency Range Maximum	4800. Hz
RPM Solution Intervals	24

Analysis Settings				
Properties	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Step Controls				
RPM Value	1500.	3000.	4500.	6000.
RPM Frequency Spacing	Linear	Linear	Linear	Linear
RPM Frequency Range Minimum	0.	0.	0.	0.
RPM Frequency Range Maximum	1200.	2400.	3600.	4800.
RPM Solution Intervals	24.	24.	24.	24.
Options				
Cluster Results	Off	Off	Off	Off

定义不同转速工况点及扫频信息

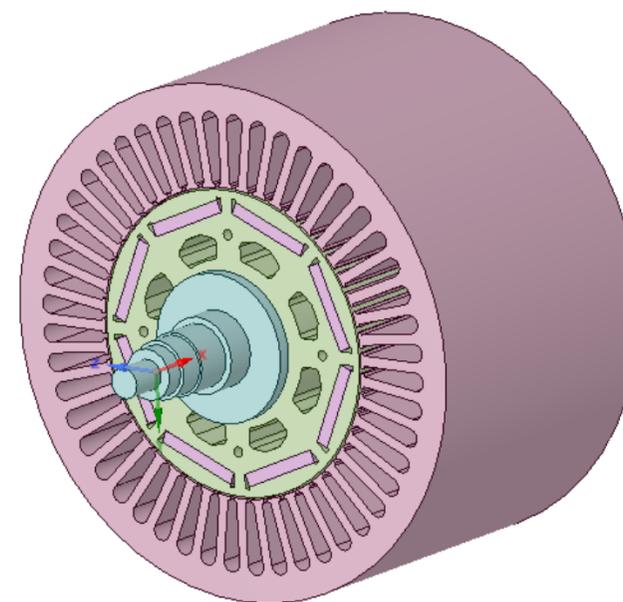
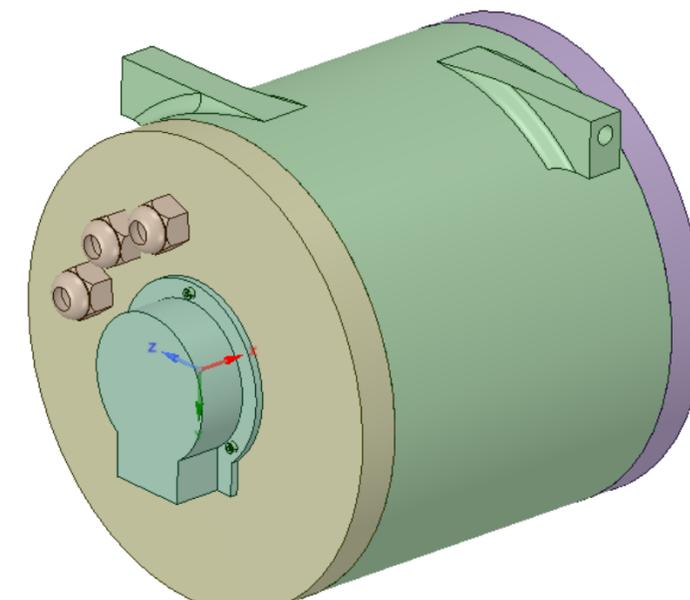
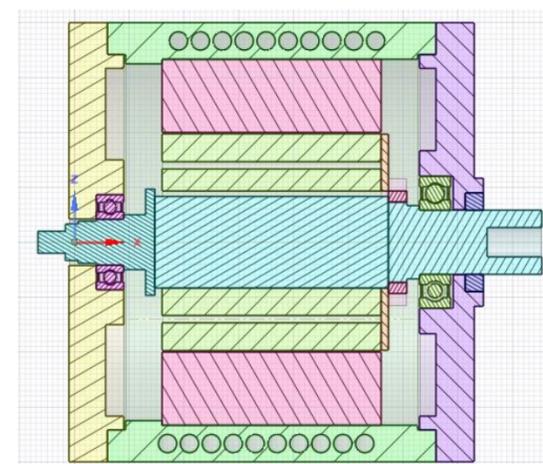
电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

- ① 电机几何模型处理
- ② 铁芯（硅钢片叠压）材料本构模型的选取及其材料参数
- ③ 绕组模型如何处理
- ④ 轴承模型的处理（转子系统与定子系统的连接处理）
- ⑤ 与模态试验数据的对标

电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

① 电机几何模型处理

- 在不影响求解要求和求解精度的前提下，对其几何进行编辑和修改；为后续划分高质量的网格做好准备。
- 如右图永磁同步电机，处理后的模型：
 - ✓ 分析模型中包含：机壳、前后端盖、定子铁心、转轴、转子铁心、磁钢；
 - ✓ 不包含或用质量点代替处理部件：油封、锁紧螺母、旋变、旋变端盖、防水接头、螺栓、螺母等。



ANSYS SpaceClaim具有强大的几何建模和编辑简化功能；同时它可以无缝读入各种CAD格式的文件。

电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

② 铁芯（硅钢片叠压）材料本构模型的选取及其材料参数

➤ 采用各项同性线弹性本构模型(3个参数)

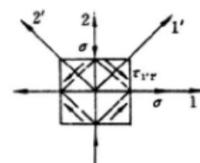
- ✓ 弹性模量、破松比、密度——3个参数

➤ 采用正交各项异性线弹性本构模型（横观各项同性—5个参数）

- ✓ 弹性模量: $E_x = E_y, E_z$
- ✓ 破松比: $\nu_{xy}, \nu_{xz} = \nu_{yz}$
- ✓ 剪切模量: $G_{xz} = G_{yz}, G_{xy} = E_x / (2 * (1 + 2\nu_{xy}))$

横观各向同性材料

各向同性面—在该平面内，各点的弹性性能在各方向上相同。



假定：1, 2, 3都是弹性主轴，1—2面是各向同性面。

正交各向异性材料

如果具有三个正交弹性对称面，则：

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}$$

只有九个独立系数

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix}$$

只有五个独立系数

电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

② 铁芯（硅钢片叠压）材料本构模型的选取及其材料参数

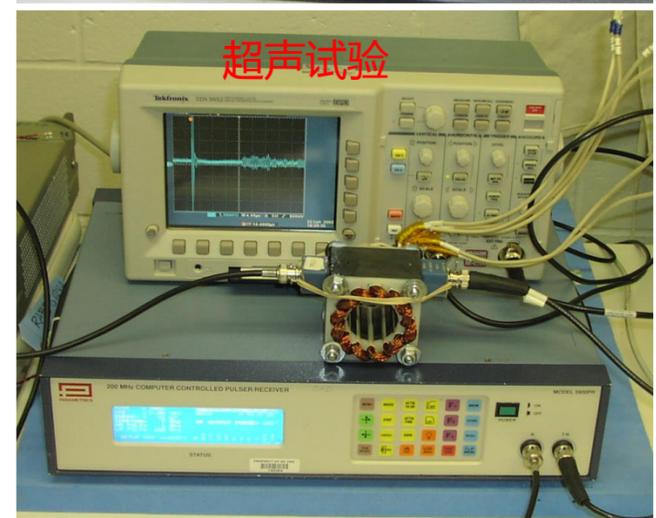
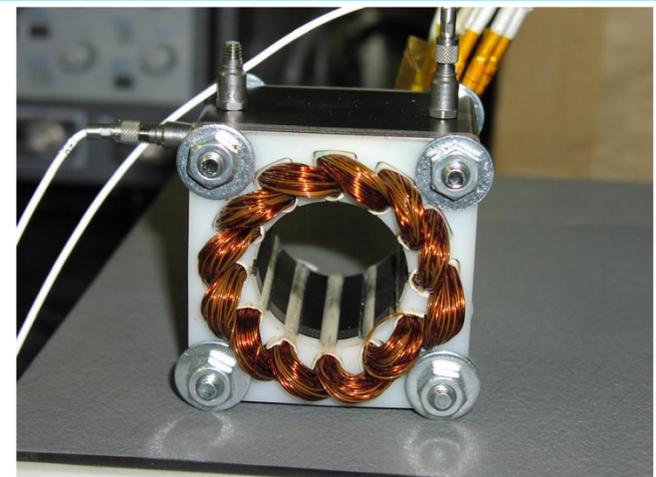
➤ 材料参数如何获取，通常有以下几种方式：

1) 查阅文献，参考有质量的、同类型相似结构的材料参数取值

属性	定子铁芯 (碟片钢)	定子槽内绕组 (铜)	机壳端盖 (铝)	磁钢 (钕铁硼)
质量密度(kg/m ³)	6960		2770	7400
杨氏模量 (Pa)	Ex=Ey=2.06E+11 Ez=1.5E+11	Ex=Ey=9.5E+10 Ez=1.4E+10	Ex=Ey=Ez=7.1E+10	Ex=Ey=Ez=1.6E+11
剪切模量 (Pa)	Gxz=Gyz=7.3E+10 Gxy=8.0E+10	Gxz=Gyz=5.4E+9 Gxy=4.6E+9	Gxy=Gxz=Gyz=2.7E+10	Gxy=Gxz=Gyz=6.5E+10
泊松比	0.3	0.3	0.33	0.24

2) 制作材料样件，进行材料力学试验（拉压试验、超声试验...）

3) 通过物理试验结果，标定材料参数取值



Ultrasonic wave speed, c , depends on the stiffness and on the density, ρ , of the materials under study [6,7]. For longitudinal waves

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

Where E is the Young's modulus. This is valid for a long homogeneous rod of length much longer than the wavelength, and width much less than the wavelength. If the width is much larger than the wavelength, then wave speed is governed by the tensorial modulus

$$c = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \frac{E}{\rho} \quad (3)$$

Where ν is the Poisson's ratio. The test motor stator used in this paper belongs to this category. So the Young's modulus of the motor stator can be described as:

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c^2 \quad (4)$$

电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

③ 绕组模型如何处理

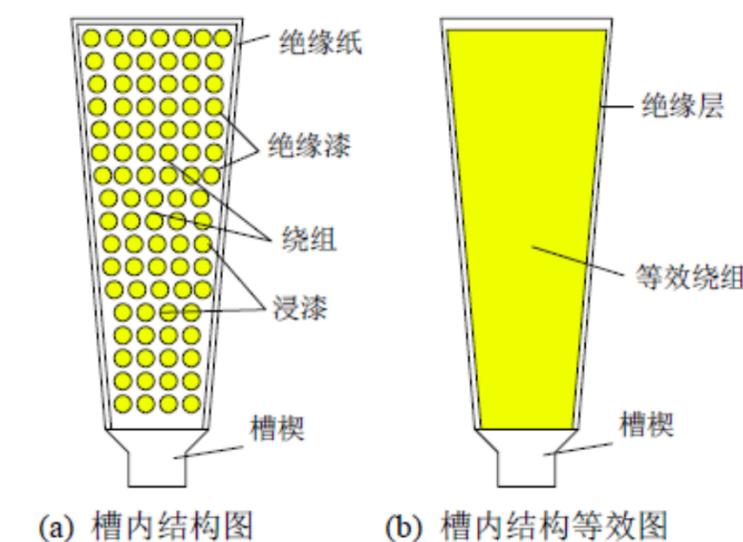
➤ 绕组对电机模态频率的影响一直是电机模态分析中的难点，原因是

1) 绕组端部形状复杂，建模难度大；

2) 绕组的弹性模量等力学参数受槽满率和浸漆工艺影响较大，材料参数仿真难以确定。

➤ 定子槽内是由绕组和绝缘物质组成；绕组是由涂有绝缘漆的导线捆扎组成，绝缘物质是由绝缘纸和绝缘体(一般为环氧树脂)组成。

➤ 电机铁心槽内绕组浸漆之后，槽内绕组与铁心形成了一个坚固的整体，可能会有效提高电机铁心刚度。



电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

③ 绕组模型如何处理

➤ 常见几种绕组模型处理方式:

- 1) 槽内绕组、端部绕组模型不建立；将绕组质量以质量点方式关联分布于定子齿槽表面；
- 2) 槽内绕组、端部绕组模型不建立；将绕组质量通过修改提高定子齿端局部区域的密度进行考虑；
- 3) 槽内绕组、端部绕组模型不建立；将绕组质量通过修改提高定子齿端局部区域的密度，并且修改定子齿部区域的弹性模型，这样同时了考虑绕组质量和刚度对结构模态的影响；
- 4) 槽内绕组建立等效模型(与铁芯齿槽面接触)，端部绕组模型不建立；端部绕组质量以质量点与槽内绕组模型关联；
- 5) 槽内绕组和端部绕组都建立等效模型。
- 6) 在5) 的基础上，并将槽内绕组细分(导线绝缘漆、槽绝缘、槽楔和槽内空隙等效成一个绝缘层)

电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

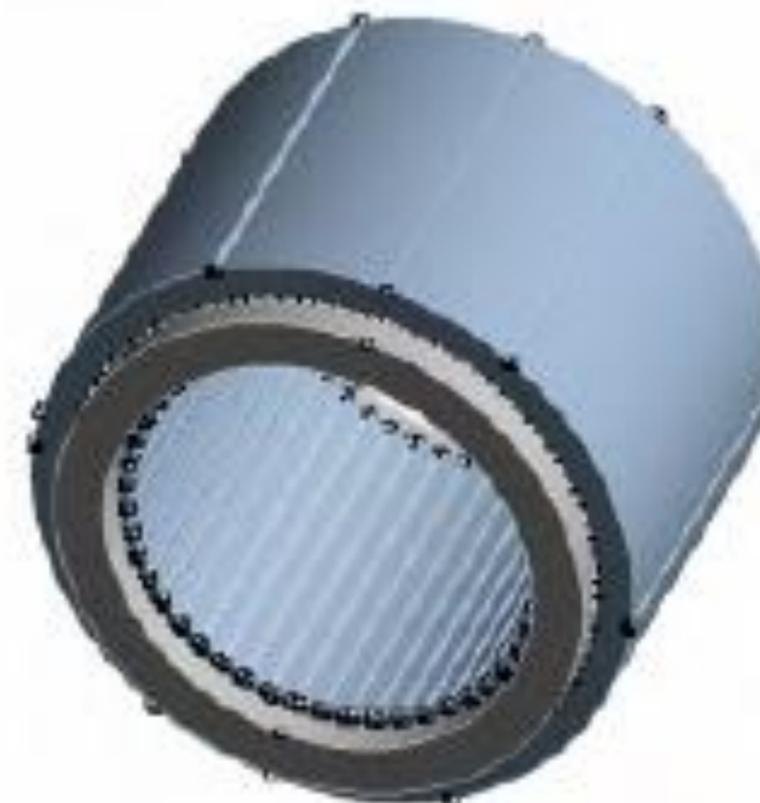
③ 绕组模型如何处理



(a) 定子铁心



(b) 绕组加绝缘漆



(c) 定子铁心组合模型

电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

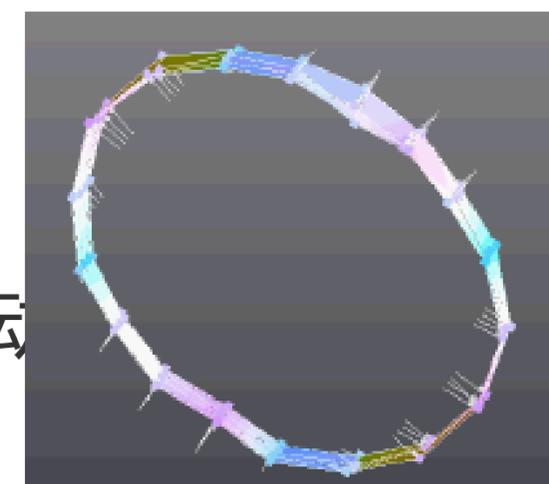
④ 轴承模型的处理（转子系统与定子系统的连接处理）

- 转子系统通过轴承与定子系统进行连接；
- 有时为了简化处理：轴承和转子铁芯都不建立仿真模型，转轴用梁单元建模；转子铁芯和轴承分别以多个质量点形式关联到转轴梁单元上；电机端盖再与转轴的梁单元进行RBE3关联（简化处理两个轴承位置处的连接）。
- 通常为了减小计算误差，建议将转子模型建立，同时将电机轴承与转子的连接采用弹簧等效，分别建立三个方向弹簧单元，设置三个方向刚度以模拟轴承在实际运行工况下的支撑刚度。

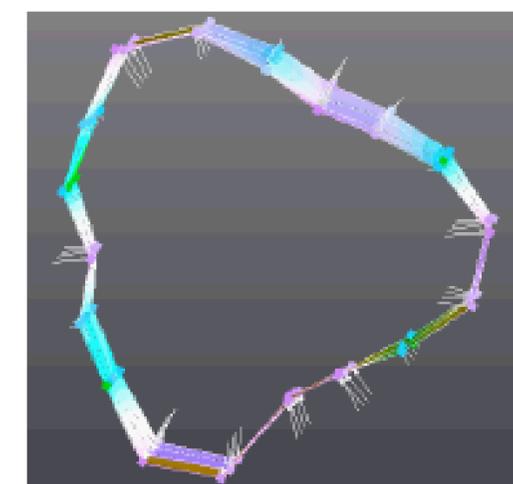
电机结构有限元建模需要考虑的几个问题

⑤ 与模态试验数据的对标

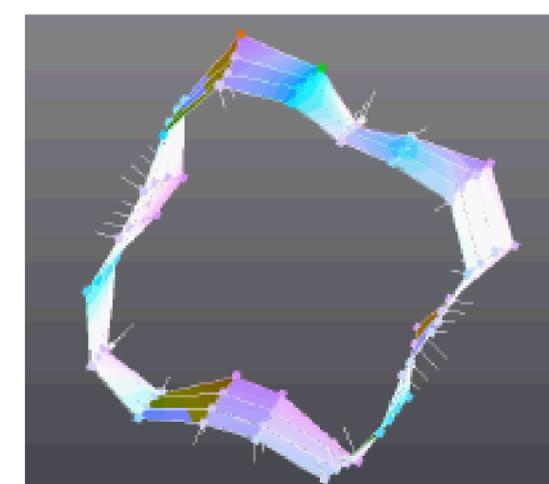
- 通过模态试验可获得重要的几阶模态频率和振型（比如前5前周向振动模态）
- 通过仿真获得的模态频率和振型需要和试验对标；
- 结构模态仿真精度不高，会直接影响后面的结构振动响应的精度，最终影响噪声分析精度。



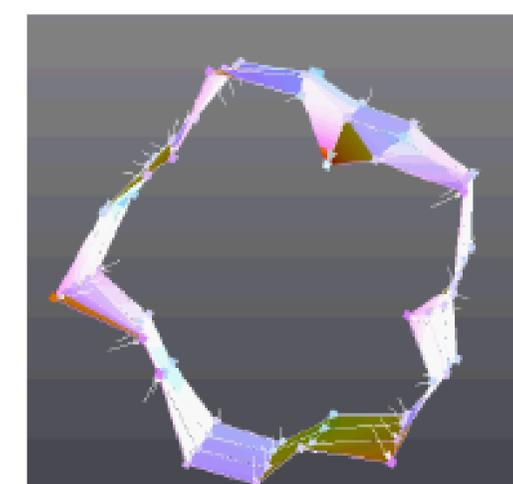
定子总成周向二阶振型



定子总成周向三阶振型



定子总成周向四阶振型



定子总成周向五阶振型

定子总成实验与仿真结果对比

阶数	仿真频率(Hz)	实验频率(Hz)	误差(%)
二阶	355	351	1.13
三阶	971	939	3.40
四阶	1782	1761	1.19
五阶	2736	2831	3.35

目录

1. 电机的多物理场耦合特性
2. 电磁力的时空特性以及电磁力的传递
3. 基于Ansys Mechanical电机多转速工况的振动噪声分析
 - Mechanical谐响应分析 及电机结构有限建模几个问题
 - Mechanical声学分析(Acoustic)

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

声学是研究声波在介质中的产生，传播，吸收和反射等问题。 声学应用包括以下内容：

- ✓ 声纳（利用水中声波对水下目标进行探测、定位和通信的电子设备）
- ✓ 彩超-医学应用
- ✓ 设计音乐厅，需要均匀分布声压
- ✓ 汽车噪音消除
- ✓ 扬声器，声学滤波器，消声器和许多其他类似设备的设计。
- ✓ 地球物理勘探...

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

ANSYS Mechanical Enterprise软件中提供的声学分析功能(目前支持声学有限元分析)

- ✓ 通常声学研究中典型的感兴趣物理量有声压/声压级、声功率/声功率级等。
- ✓ 压力解是偏离平均压力值，而不是绝对压力。
- ✓ 耦合声学分析可以考虑了声场- 结构相互作用。 非耦合声学分析仅模拟声场，并忽略声场 - 结构相互作用。

Physical	Quantity State	Variable Units
Pressure	$P_{total} = P + p(r,t)$	Pascals
Velocity	$U_{total} = U + u(r,t)$	meters/second
Temperature	$T_{total} = T + \tau(r,t)$	Celsius
Density	$\rho_{total} = \rho + \sigma(r,t)$	kg/m ³

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

声-固耦合方程（强耦合）

- ✓ 如果想要考虑声压 - 结构相互作用（由结构振动产生压力波、以及由于压力波引起的结构变形），您可以使用耦合声学分析。
- ✓ 声场和结构的交界面处相互作用；声压施加到该交界面上，同时该交界面运动又产生所谓的“流体载荷”。这样，控制有限元矩阵方程变为：

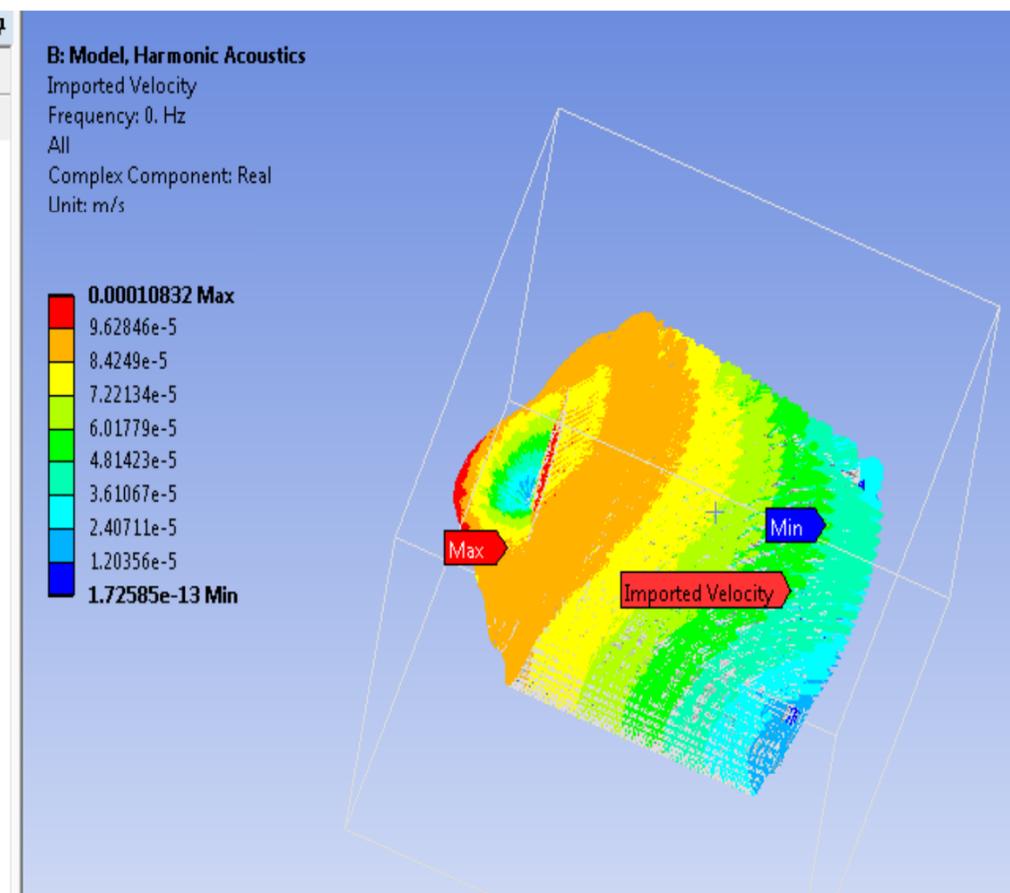
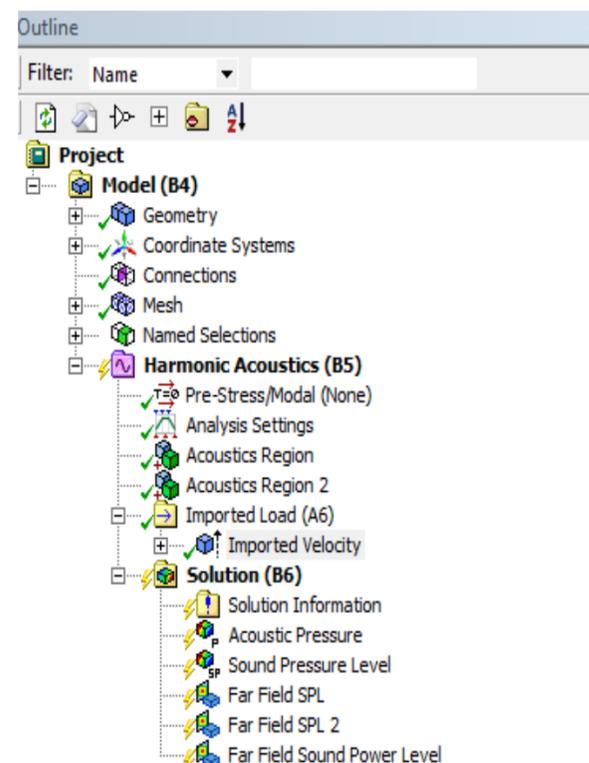
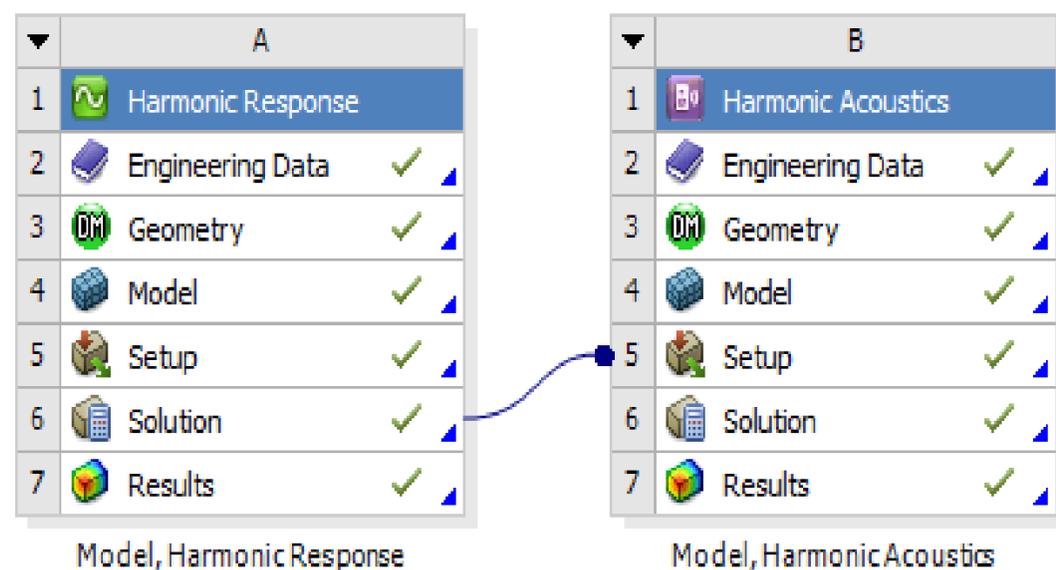
$$\begin{aligned}
 [M_S] \{\ddot{U}\} + [K_S] \{U\} &= \{F_S\} + [R] \{P\} \\
 [M_f] \{\ddot{P}\} + [K_f] \{P\} &= \{F_f\} - \rho_0 [R]^T \{\ddot{U}\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \rho_0 [R]^T & [M_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_e\} \\ \{\ddot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{p_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_S \\ f_F \end{Bmatrix}$$

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

声-固耦合方程（弱耦合）

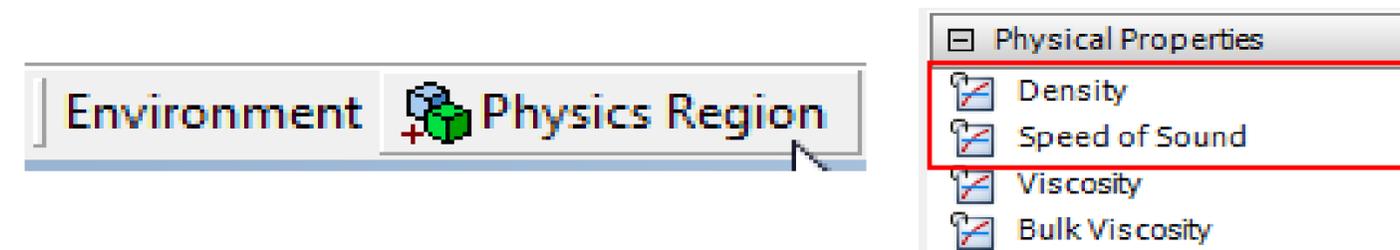
✓ 只考虑结构振动对声场的影响，不考虑声场声压对结构变形的影响。即为单向耦合分析。



Ansys Acoustic基本概念及分析功能

声场域和介质材料属性

- ✓ 模型中声场域通过 “Acoustics Region” 指定；
- ✓ 声场介质的材料属性：密度和声速必须定义。



Details of "Acoustics Region"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Structural	No
Acoustics	Yes
Suppressed	No
[-] Acoustic Domain Definition	
Artificially Matched Layers	Off

声场有限元模型网格尺寸要求

- ✓ 网格应该足够精细来捕获声波传播。
- ✓ 对于线性单元，每个波长至少需要12个单元，而二次单元需要每个波长6个单元。

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

如果已知计算中的频率范围，那么所有单元边长应满足条件

$$L \leq \frac{c}{6f_{\max}}$$

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

波吸收边界

- ✓ 外部声学问题通常涉及浸没在无限，均匀，无粘性流体中。
- ✓ 在FEA中，我们需要截断域。波吸收条件允许我们对声域的较小部分进行建模即可，并假设声波向外传播并且不反射回来。
- ✓ Ansys Acoustic中声波吸收边界条件有3种类型可供使用：

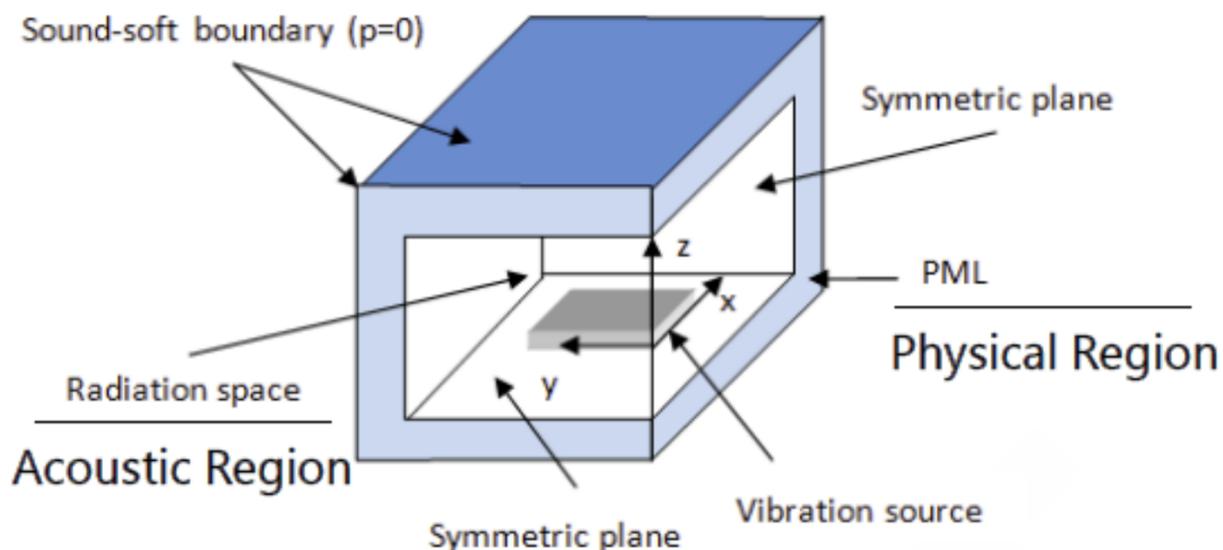
- 完全匹配层条件-PML
- 辐射边界-Radiation Boundary
- 吸收流体单元-Absorption Fluid Elements :

Type	Modal	Harmonic
PML	no	yes
Radiation Boundary	yes	yes
Absorption Elements	yes	yes

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

完全匹配层条件-PML

- Regular vs. Irregular: cubic vs. convex
- Optimize the absorbing efficiency
 - ✓ Number of PML layers
 - ✓ Thickness of PML region
 - ✓ sound-soft Dirichlet boundary with $p = 0$



Details of "Physics Region"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Structural	No
Acoustics	Yes
Suppressed	No
Acoustic Domain Definition	
Artificially Matched Layers	PML
PML Options	
PML Element Coordinate System	Global Coordinate System
PML Options	3D PML
Reflection Coefficients	Program Controlled
Evanescent Wave Attenuation	No

Acoustic Region

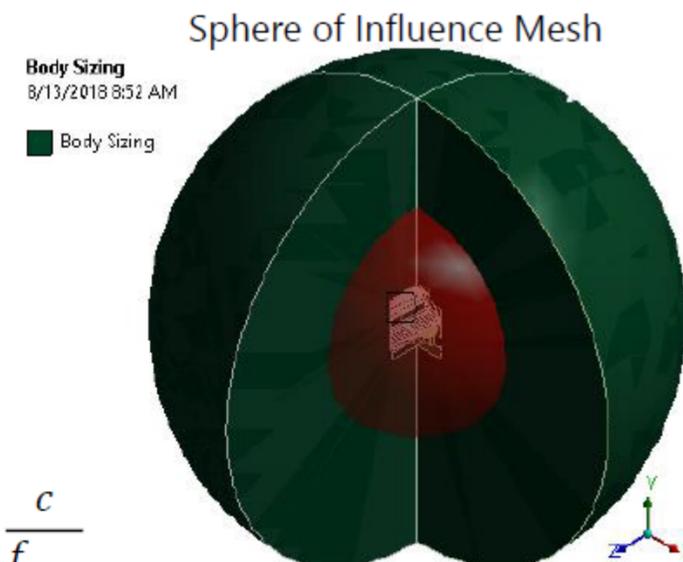
It is recommended the radius is HALF of $\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}}$

Physical Region

It is recommended the radius is QUARTER of λ_{\max}

Element Size

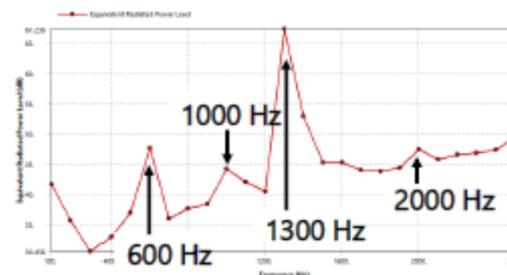
- Acoustic region
1/6 (quadratic elements) or 1/12 (linear elements) of $\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}}$
- Physical region
At least 4 layers of elements



$$\text{Wavelength } \lambda = \frac{c}{f}$$

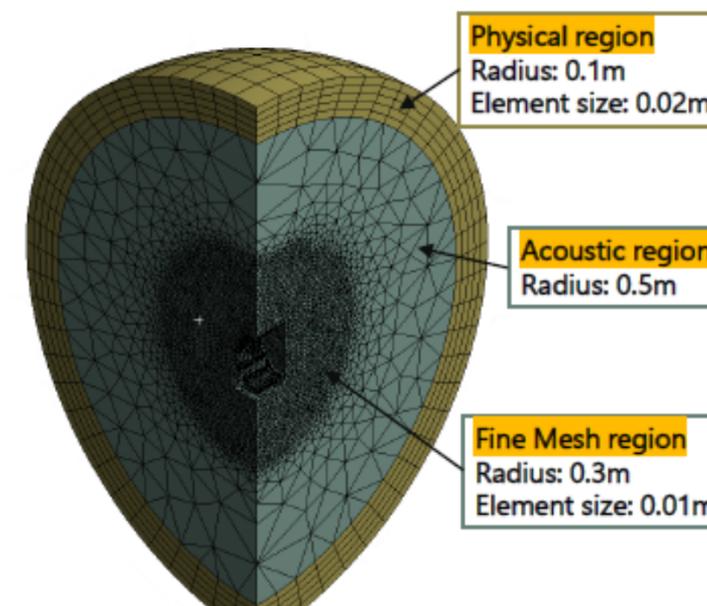
c : The speed of sound in air, 343 m/s at 20°C

f : Excitation frequency (Hz)



$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{343}{600} = 0.57\text{m}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{343}{2000} = 0.17\text{m}$$

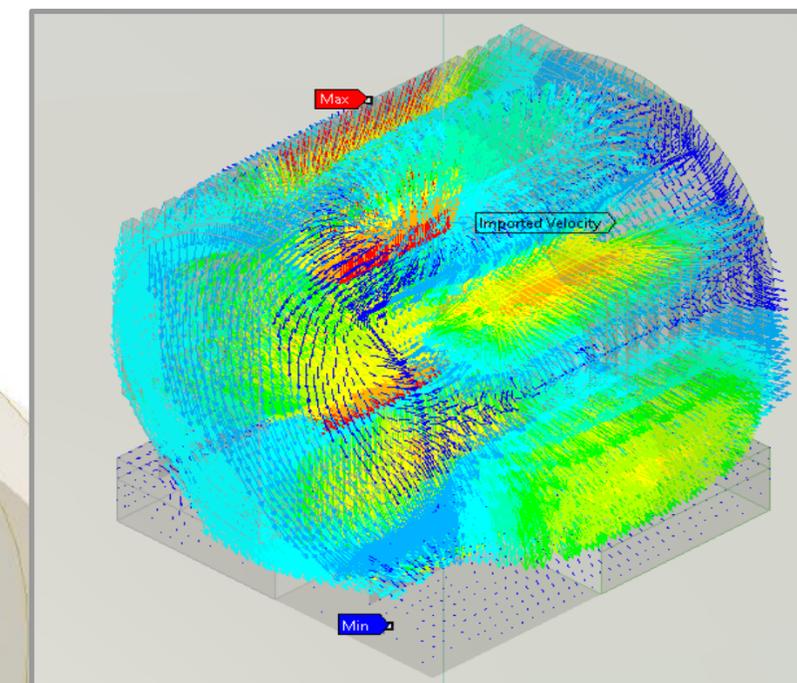
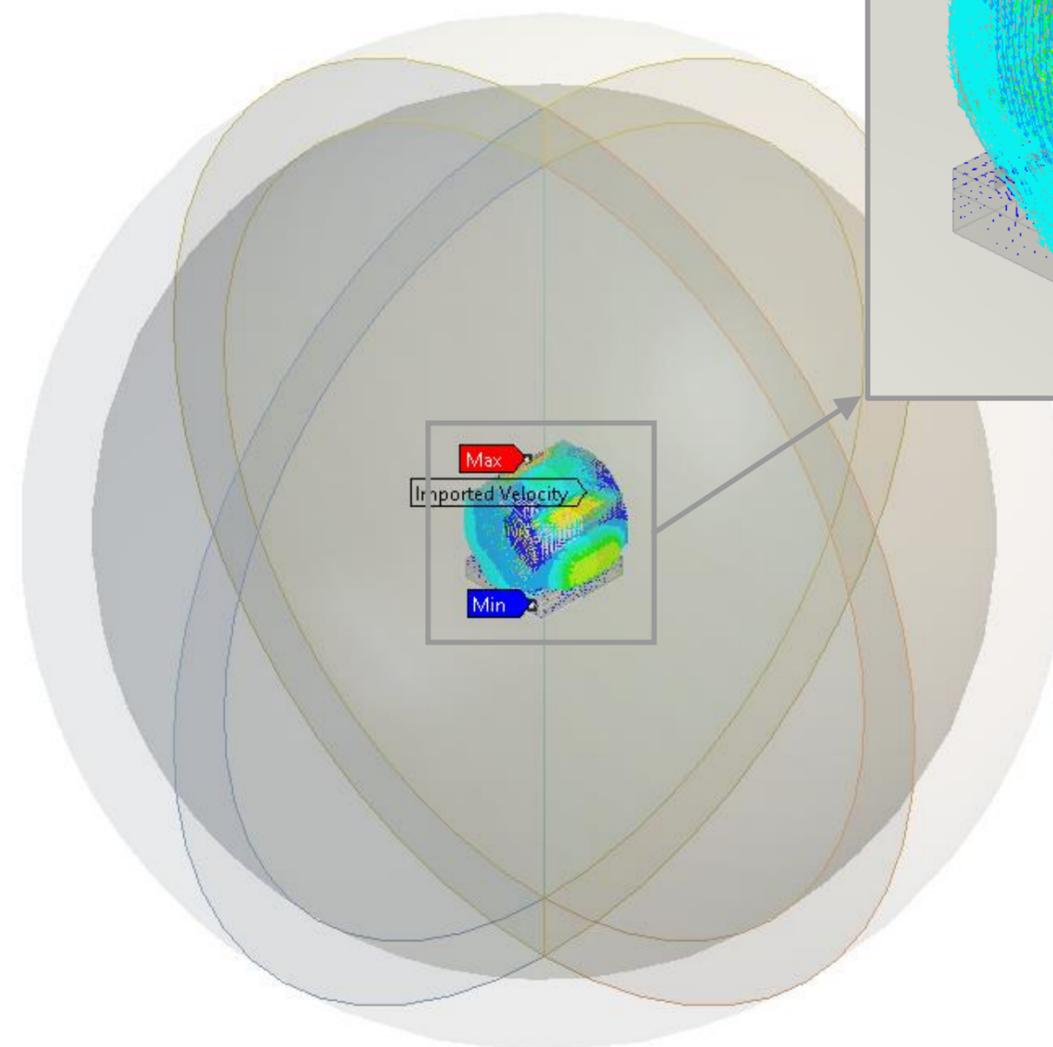
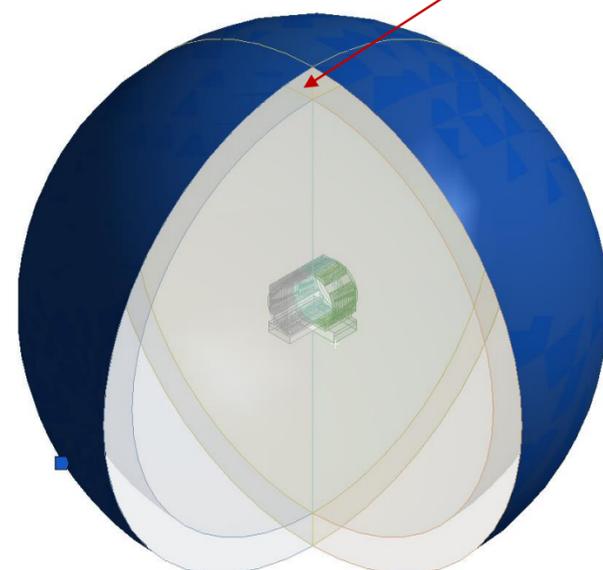


Ansys Acoustic基本概念及分析功能

完全匹配层条件-PML

PML

- [-] LSSM1_A_2D_E (H5)
 - [-] Pre-Stress/Modal (None)
 - [-] Analysis Settings
 - [-] Acoustics Region
 - [-] Physics Region
 - [-] Pressure
 - [+] Imported Load (D6)
 - [-] Solution (H6)
 - [-] Solution Information
 - [-] Sound Pressure Level
 - [-] Far-field SPL
 - [+] Sound Pressure Level
 - [+] Far-field SPL



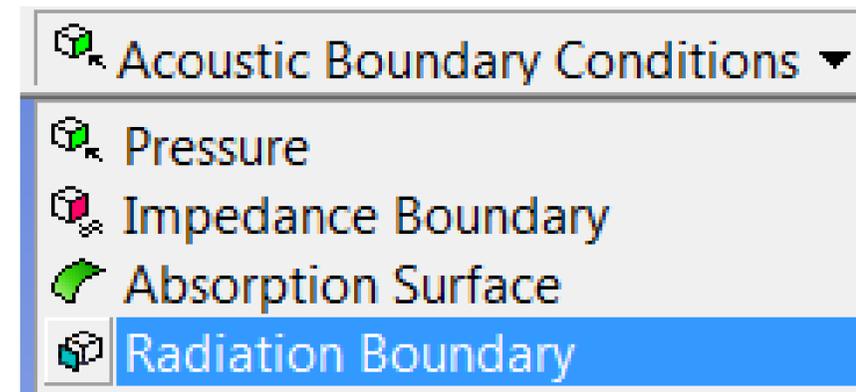
Details of "Pressure"

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Faces
[-] Definition	
ID (Beta)	444
Type	Pressure
<input type="checkbox"/> Magnitude	0. Pa
Suppressed	No

Ansys Acoustic基本概念及分析功能

• 辐射边界Radiation Boundary

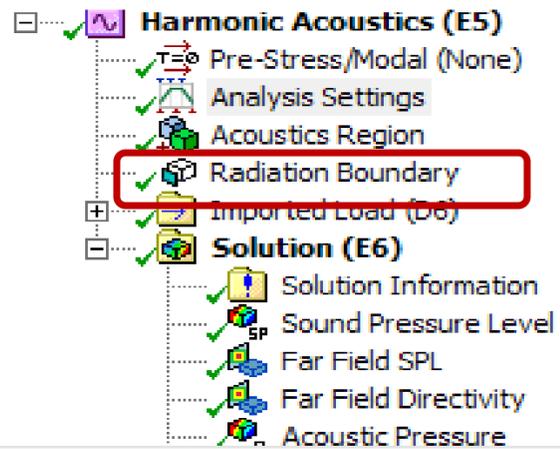
- ✓ 可在任何类型的表面上施加吸收边界（没有表面形状限制）。辐射边界实际采用的是Robin condition，该边界条件可用于谐波响应，模态分析。
- ✓ Robin条件(INF)被视为指定的阻抗边界，表面阻抗 = $\rho * c$ （密度和声速）。
- ✓ 采用辐射边界时，建议声域尺寸至少包括四分之一的波长，其中波长基于感兴趣的最低频率。
- ✓ 辐射边界对声场建模更便捷（只需在截取后的外表面指定为辐射边界 Radiation Boundary即可），但与完美匹配层（PML）相比，精度可能相对逊色。



Details of "Radiation Boundary"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Radiation Boundary
Suppressed	No

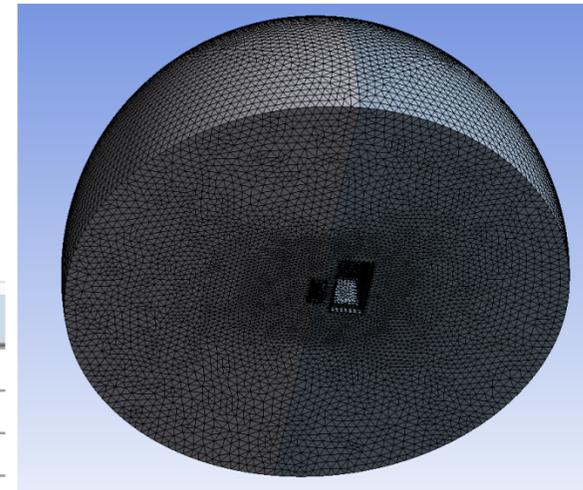
Ansys Acoustic基本概念及分析功能

• 辐射边界Radiation Boundary

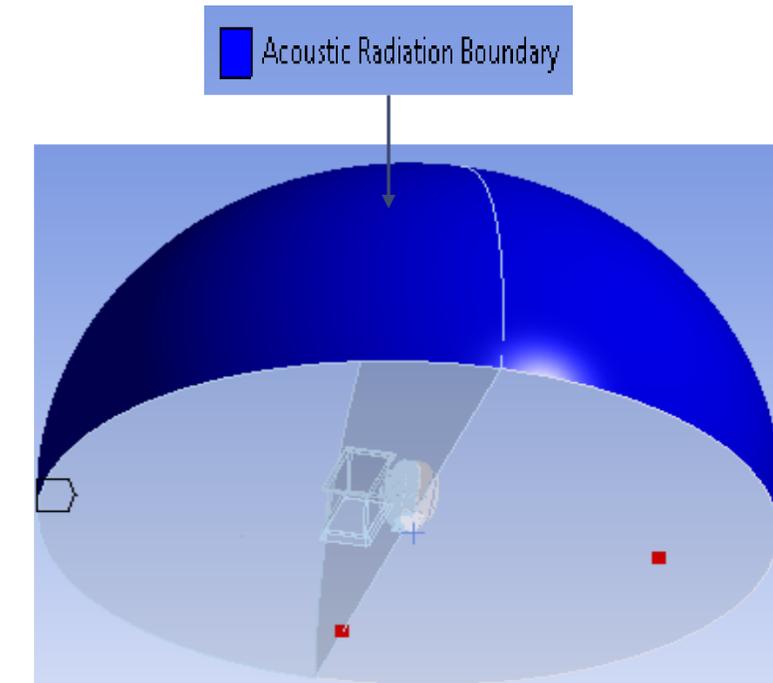


Details of "Analysis Settings"

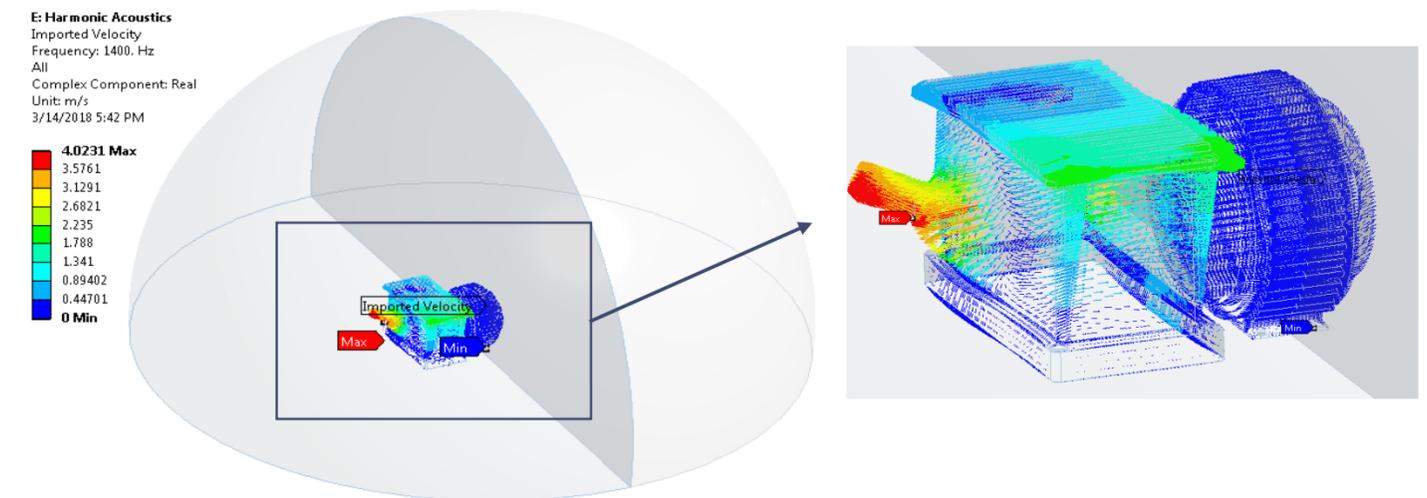
Options	
Frequency Spacing	Linear
<input type="checkbox"/> Range Minimum	0. Hz
<input type="checkbox"/> Range Maximum	1500. Hz
<input type="checkbox"/> Solution Intervals	30
User Defined Frequencies	Off
Solution Method	Full
Variational Technology	Program Controlled
Scattering Controls	
Scattered Field Formulation	Program Controlled
Advanced	
Far-field Radiation Surface	Program Controlled
Output Controls	
Analysis Data Management	



Mesh as per 1500Hz



Air Domain around powertrain

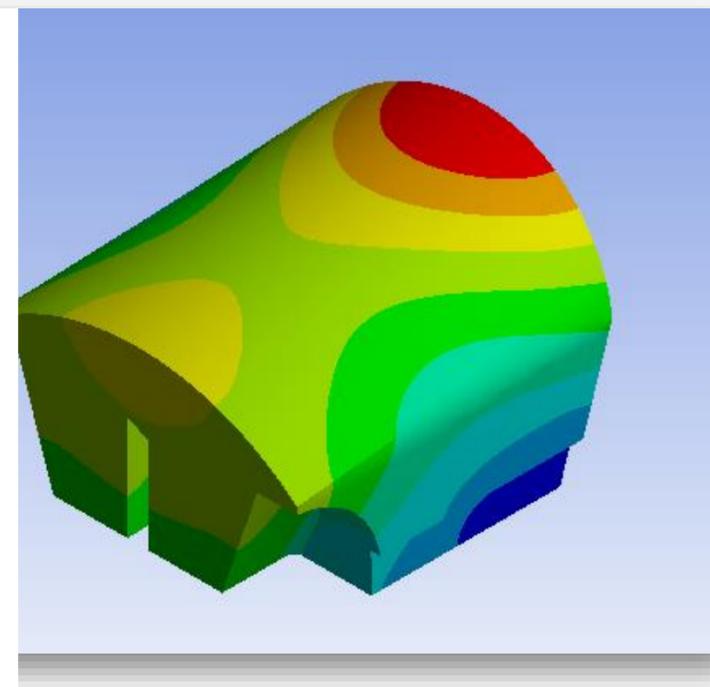
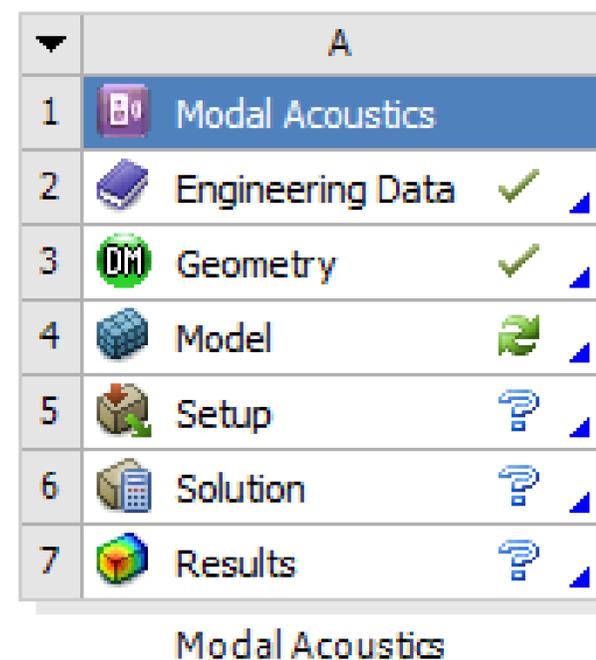


Surface velocity import from structural harmonic

Ansys Acoustic支持的分析类型

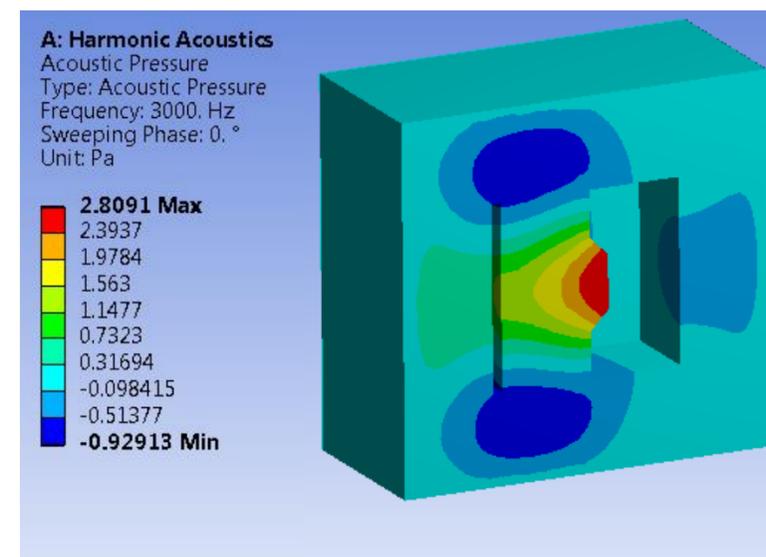
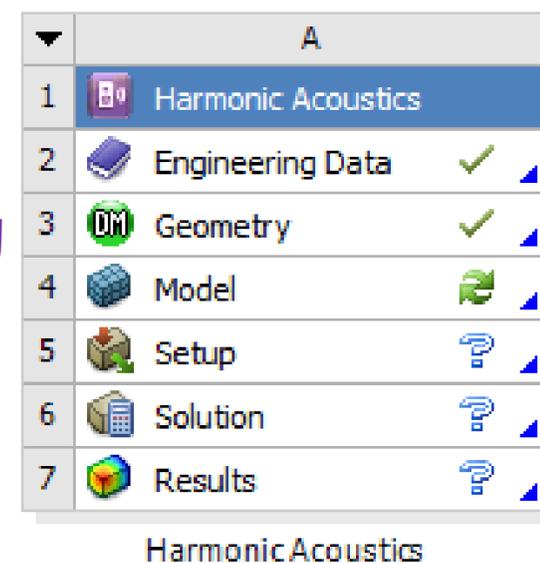
➤ Modal Analysis (frequency domain)

- ✓ 模态分析的目标是确定内部声场的频率和驻波模式
- ✓ 声场模态分析支持阻抗边界定义，也支持与结构相互作用 (FSI) 的模态分析

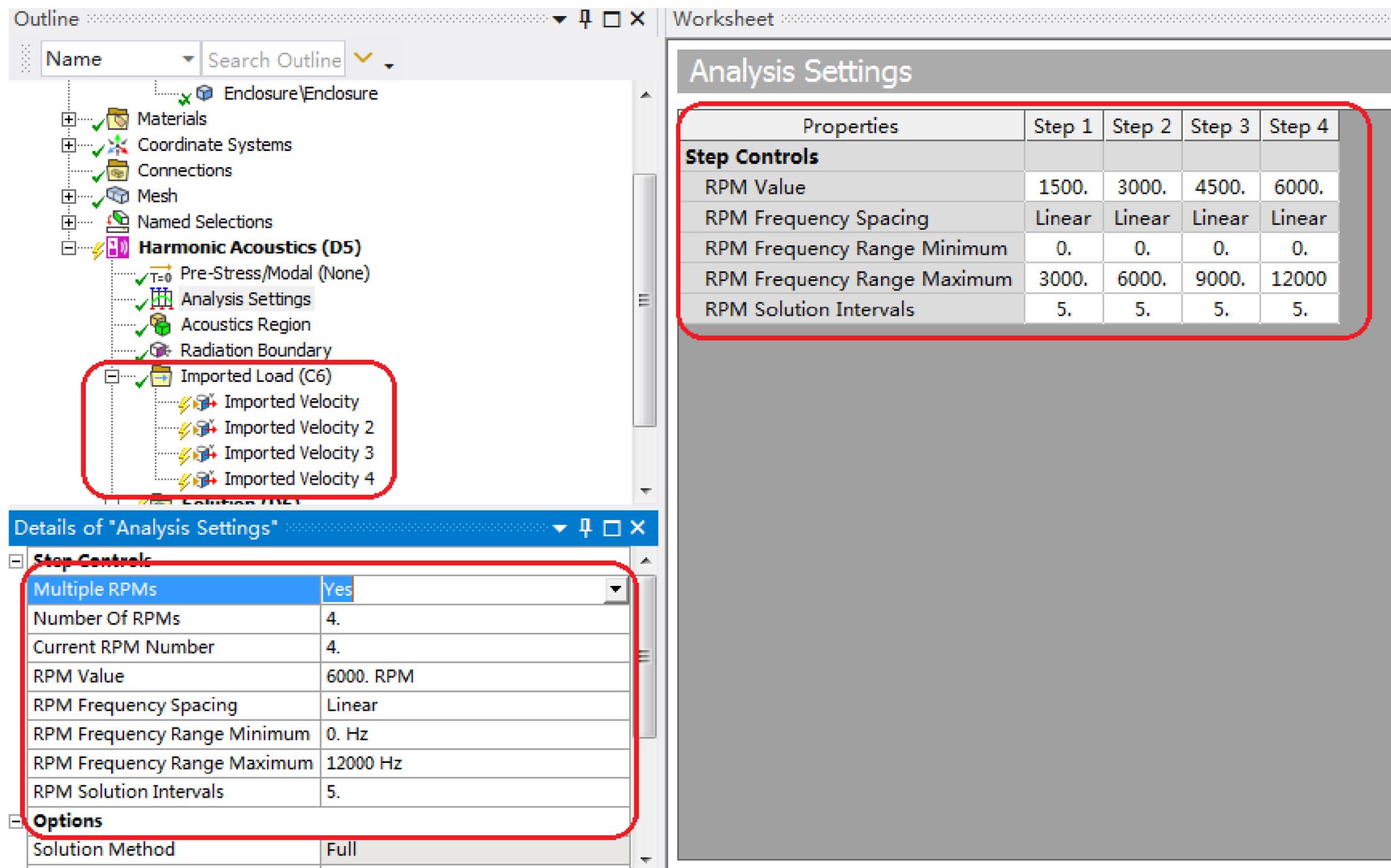


➤ Harmonic Response Analysis (frequency domain)

- ✓ 声场谐波分析的目的是考虑流速或压力激励来计算系统作为频率的函数的响应
- ✓ Full Harmonic are supported



Harmonic Acoustic分析中设置多转速点工况MRPs



Outline

- Endlosure\Endlosure
 - Materials
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh
 - Named Selections
 - Harmonic Acoustics (D5)**
 - Pre-Stress/Modal (None)
 - Analysis Settings
 - Acoustics Region
 - Radiation Boundary
 - Imported Load (C6)
 - Imported Velocity
 - Imported Velocity 2
 - Imported Velocity 3
 - Imported Velocity 4

Worksheet

Analysis Settings

Properties	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Step Controls				
RPM Value	1500.	3000.	4500.	6000.
RPM Frequency Spacing	Linear	Linear	Linear	Linear
RPM Frequency Range Minimum	0.	0.	0.	0.
RPM Frequency Range Maximum	3000.	6000.	9000.	12000
RPM Solution Intervals	5.	5.	5.	5.

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Multiple RPMs	Yes
Number Of RPMs	4.
Current RPM Number	4.
RPM Value	6000. RPM
RPM Frequency Spacing	Linear
RPM Frequency Range Minimum	0. Hz
RPM Frequency Range Maximum	12000 Hz
RPM Solution Intervals	5.
Options	
Solution Method	Full

Harmonic Acoustic分析中设置多转速点工况MRPs

D: Harmonic Acoustics
 Imported Velocity
 Frequency: 600. Hz
 All
 Complex Component: Imaginary
 Unit: mm/s
 2019/5/19 22:56

0.337331 Max
 0.29985
 0.262368
 0.224887
 0.187406
 0.149925
 0.112444
 0.0749624
 0.0374812
0 Min

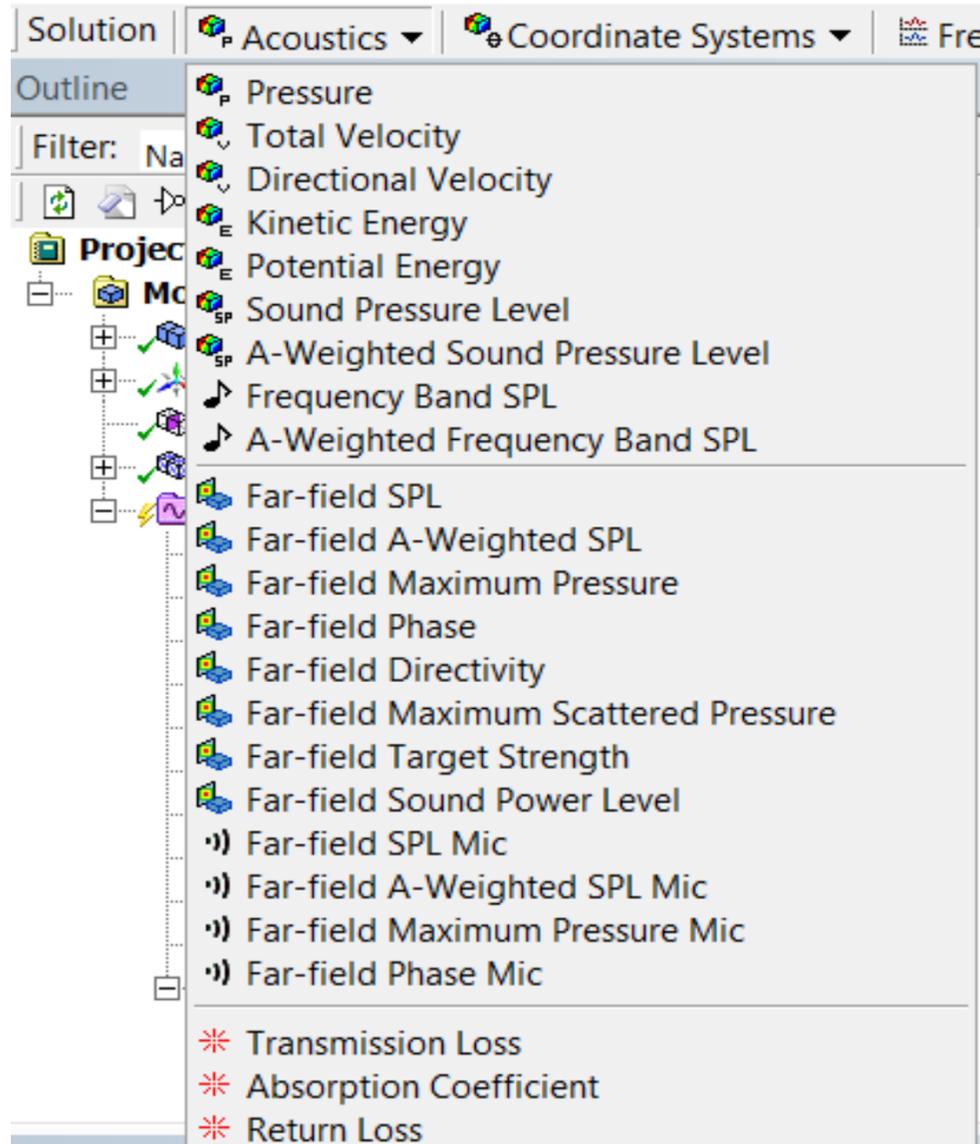
Details of "Imported Velocity"

Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	ASI
Definition	
Type	Imported Velocity
Tabular Loading	Program Controlled
Suppressed	No
Source Bodies	All
RPM Selection	1500. RPM
Source Frequency	All

Data View
 Imported Velocity

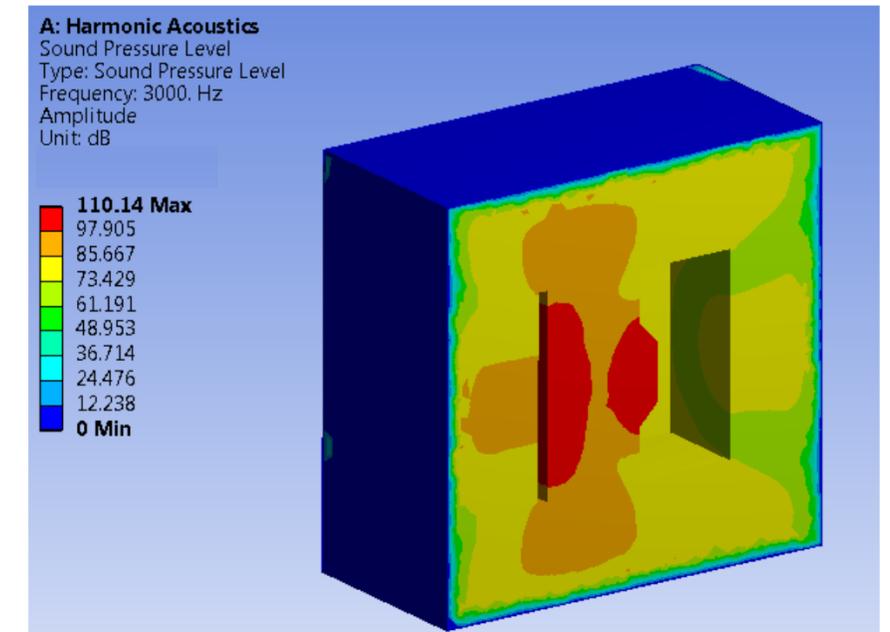
Ansys Acoustic后处理

- 声压、声压级、A计权声压级、远场SPL、远场SPL Mic...



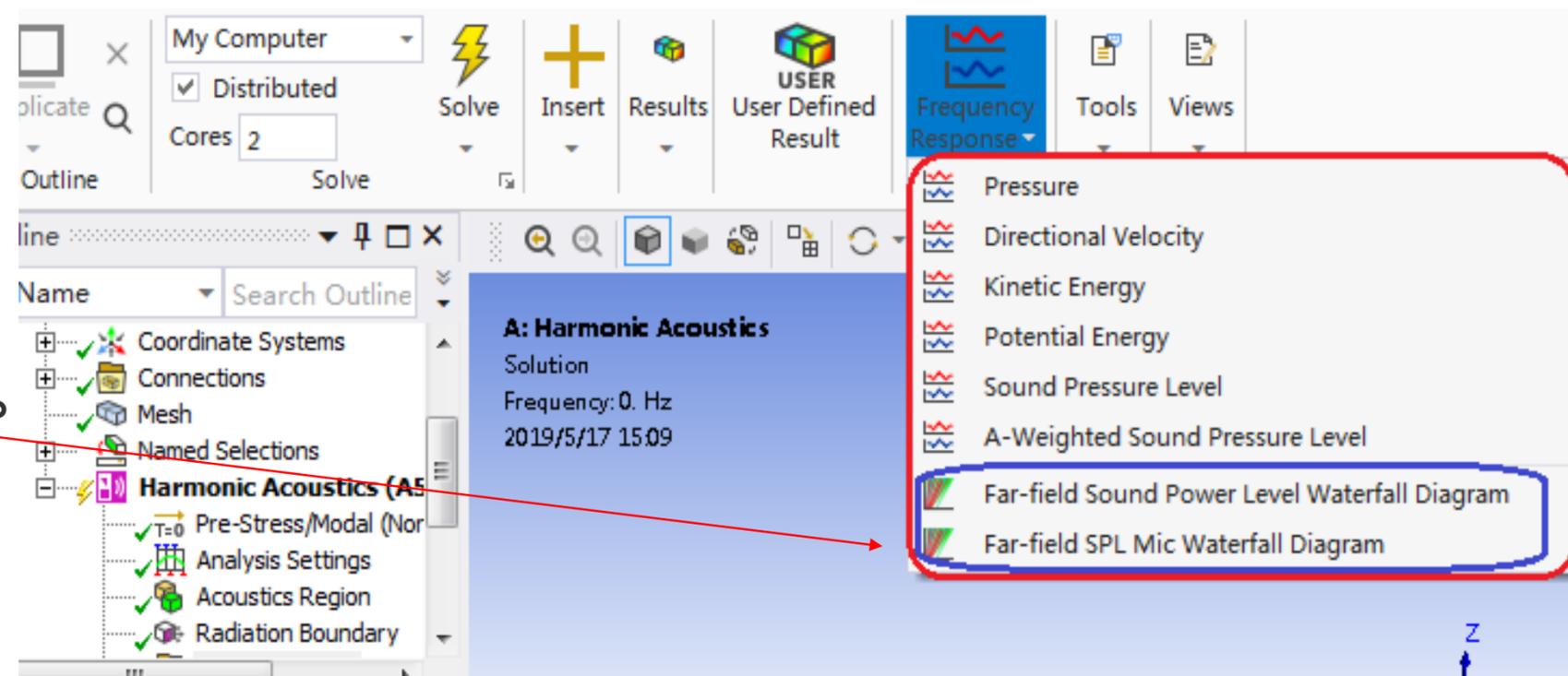
$$L_{SPL} = 10 \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) = 10 \log \left(\frac{p_{real}^2 + p_{imag}^2}{2 p_{ref}^2} \right) \quad (dB)$$

Details of "Sound Pressure Level"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Acoustic Bodies
Definition	
Type	Sound Pressure Level
By	Frequency
<input type="checkbox"/> Frequency	Last
Identifier	
Suppressed	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0. dB
<input type="checkbox"/> Maximum	110.14 dB
Minimum Occurs On	PML
Maximum Occurs On	computational_domain
Information	
<input type="checkbox"/> Reported Frequency	3000. Hz

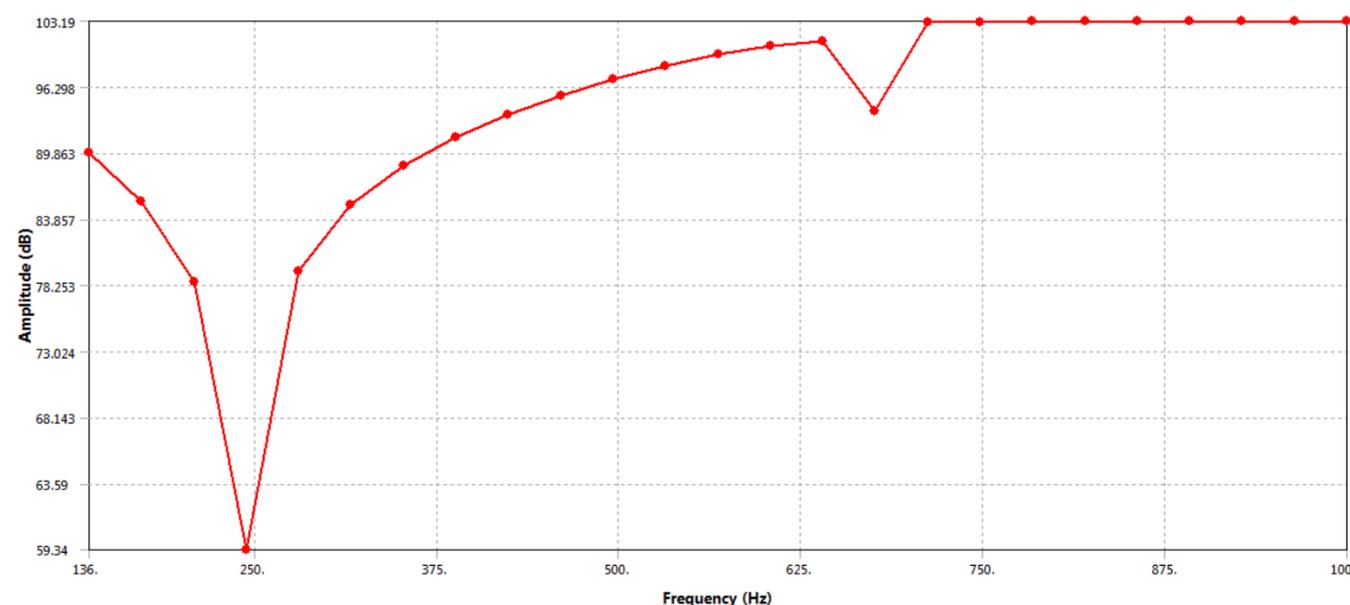


Ansys Acoustic后处理

- 声场物理量的频响曲线、瀑布图等
- 瀑布图为Ansys最新版本2019R2的新功能。

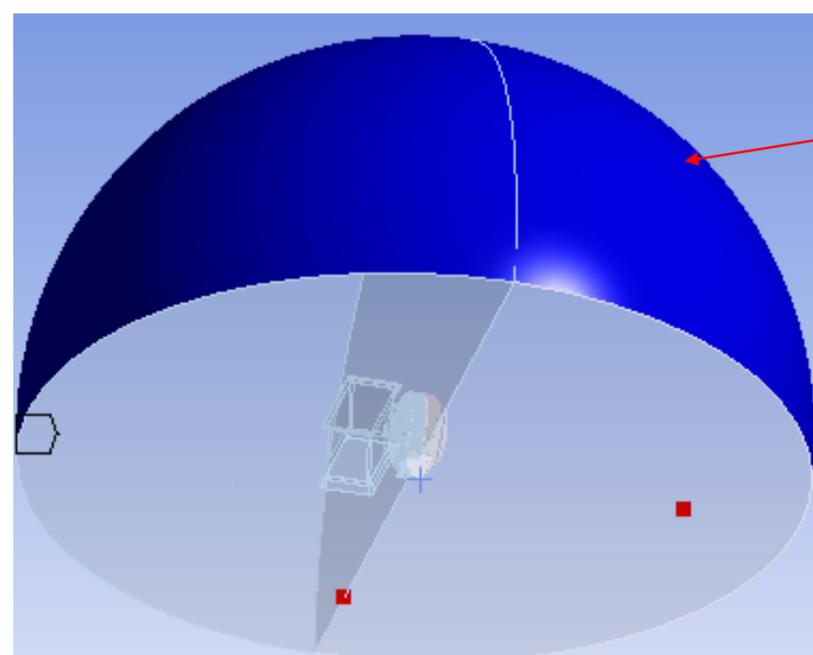
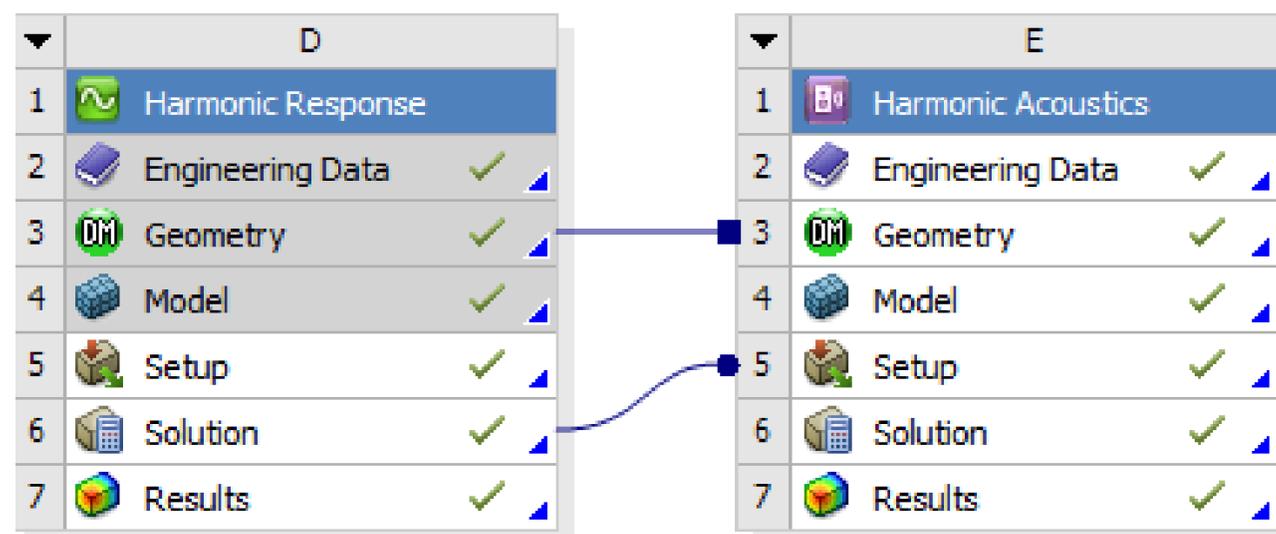


Details of "Frequency Response"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Spatial Resolution	Use Average
Definition	
Type	Sound Pressure Level
Suppressed	No
Options	
Frequency Range	Use Parent
Minimum Frequency	100. Hz
Maximum Frequency	1000. Hz
Display	Bode
Chart Viewing Style	Log Y
Results	



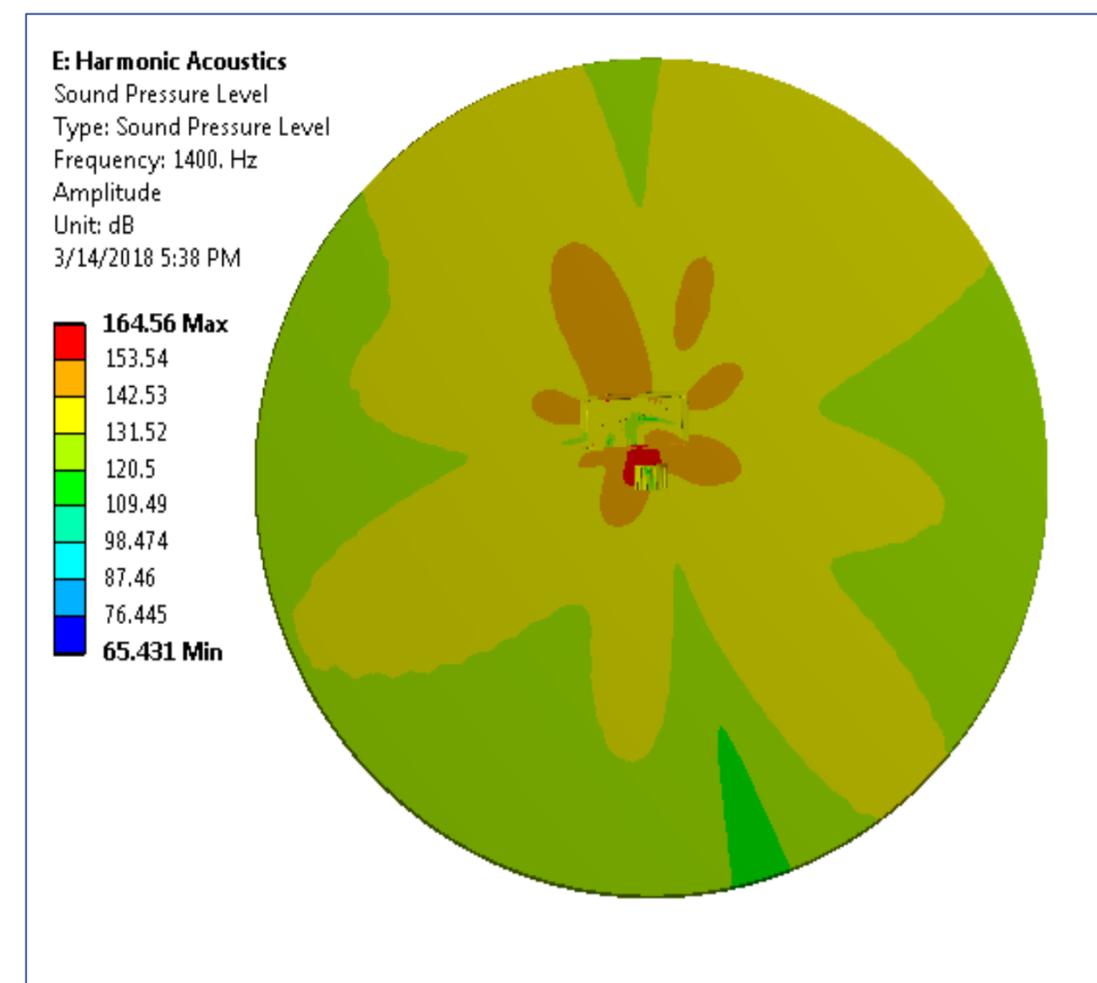
Ansys Acoustic后处理

➤ 可在每个位置(例如1米处)提供相对准确的声压和声级(SPL)



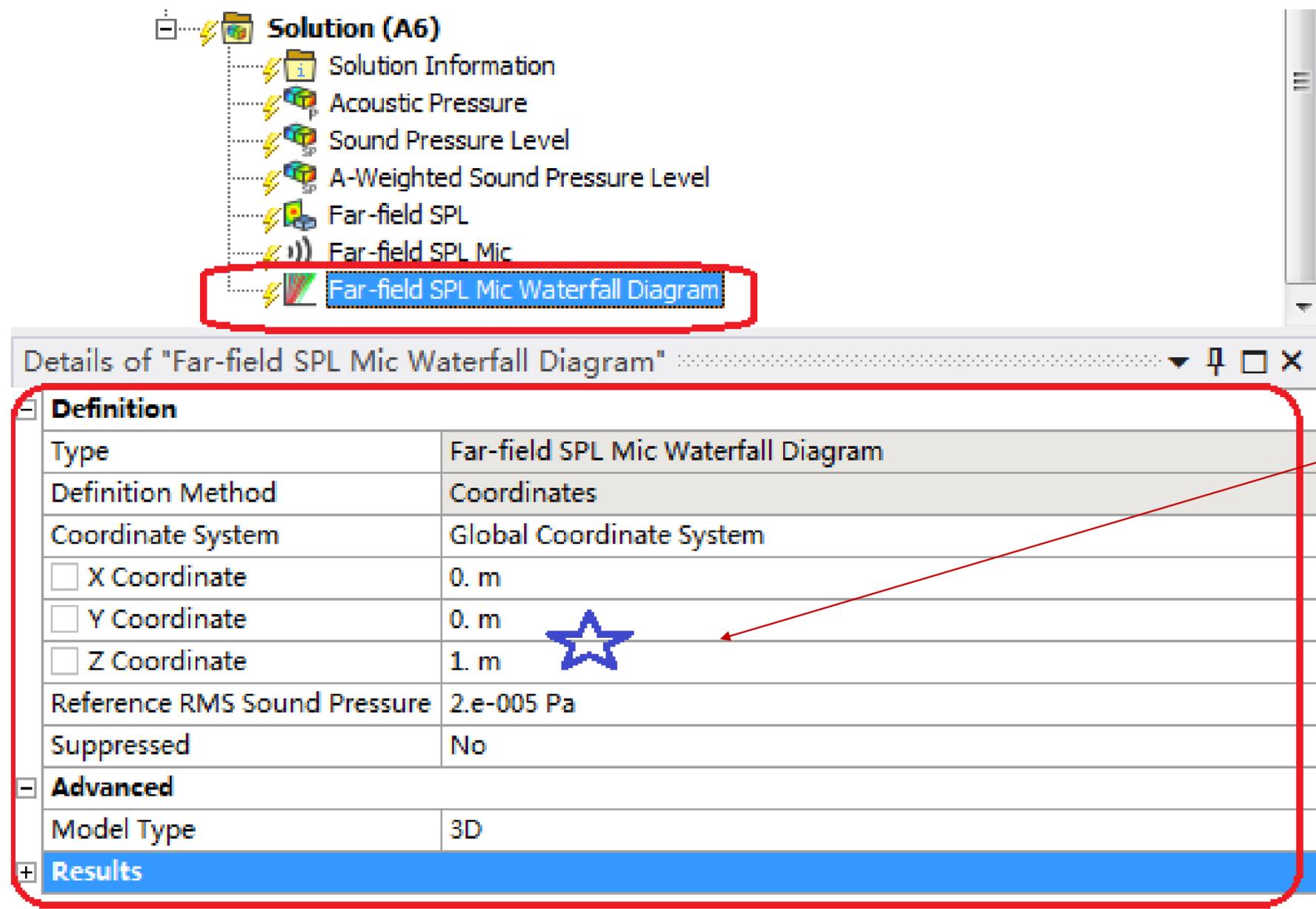
辐射边界

电机周围的空气域



查看整个空气域在某个频率下的声压级

Ansys Acoustic后处理



Solution (A6)

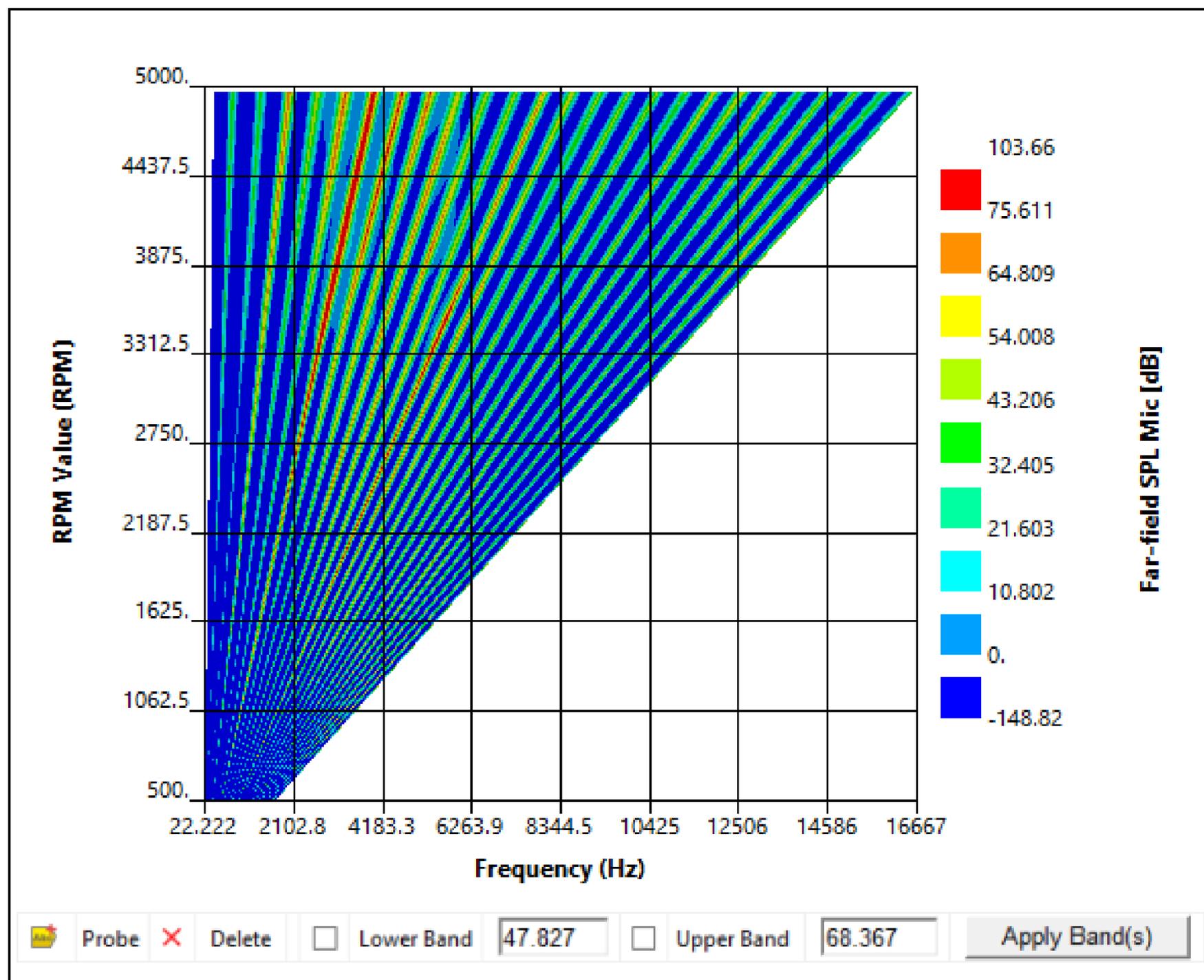
- Solution Information
- Acoustic Pressure
- Sound Pressure Level
- A-Weighted Sound Pressure Level
- Far-field SPL
- Far-field SPL Mic
- Far-field SPL Mic Waterfall Diagram**

Details of "Far-field SPL Mic Waterfall Diagram"

Definition	
Type	Far-field SPL Mic Waterfall Diagram
Definition Method	Coordinates
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0. m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	1. m 
Reference RMS Sound Pressure	2.e-005 Pa
Suppressed	No
Advanced	
Model Type	3D
Results	

指定SPL测试位置，输出SPL瀑布图

Ansys Acoustic后处理(SPL瀑布图的输出)



感谢倾听

期待与您的进一步合作 😊



扫码关注获得：

- 获得海内外最新CAE资讯/干货
- 免费参加培训/市场活动

联系我们

- <https://www.idaj.cn/>
- support@idaj.cn
- 021-50588290 ; 010-65881497

IDAJ-China官方微信公众号