



中国一汽

电动汽车驱动电机电磁、结构及声学的 多元耦合数值分析研究

曾金玲

2013年11月13日

1

研究背景

2

研究目标

3

电机的电磁激振力分析

4

电机的结构响应分析

5

电机的辐射噪声分析

6

结论

1、研究背景

□ 车用永磁同步电机有三个永无止境的性能挑战：

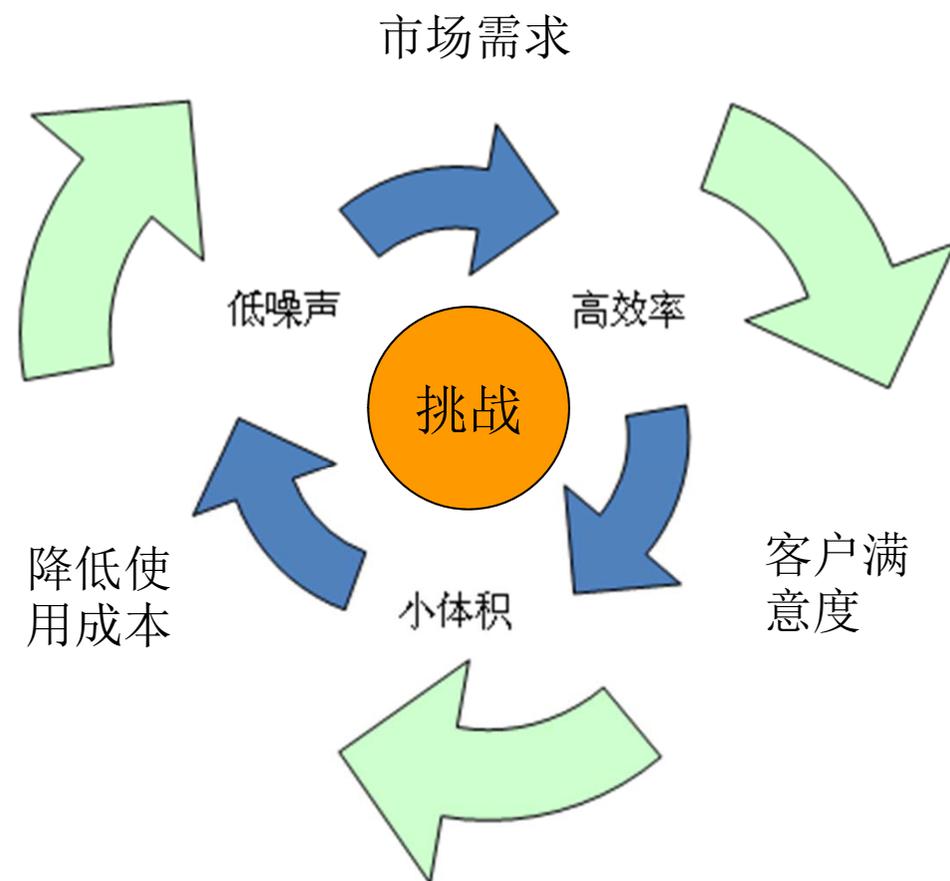
- 小体积
- 低噪声
- 高效率

□ 电机振动噪声识别难：

- 电磁噪声
- 机械噪声
- 流体噪声
- 整车装配后更难识别振动噪声源

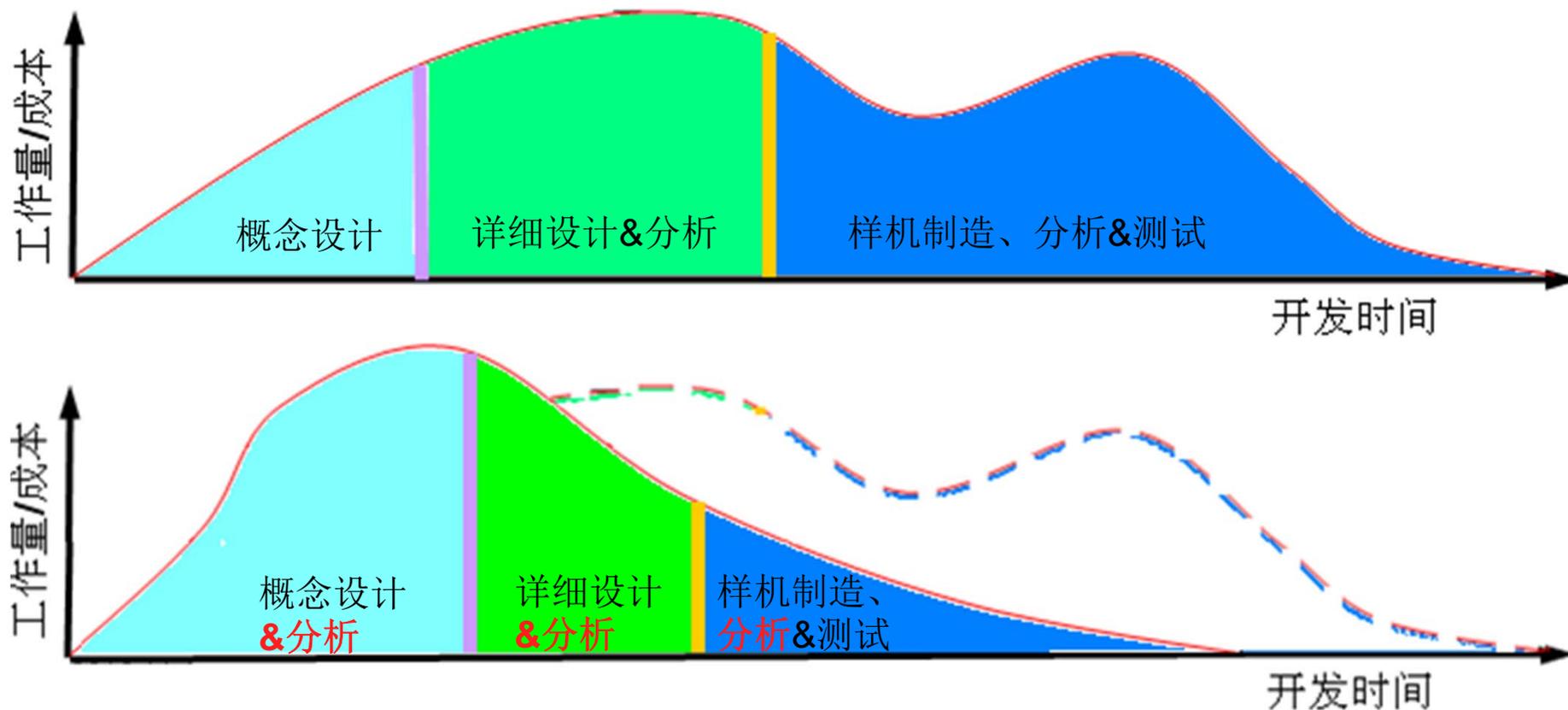
□ 电机减振降噪难：

- 被动减振降噪
- 主动减振降噪
- 无论哪种降噪方式都将花费大量的人力、物力、时间



2、研究目标

- 对电机在电磁激励力作用下的振动噪声进行系统分析。
- 提出一种高效、高精度的电磁、结构及声学多元耦合数值分析方法，在电机的设计阶段，快速预测和评价电机的振动噪声性能，减少电机的反复试制及试验次数。
- 针对电机的铁芯叠片结构，结合大量试验，为高精度的有限元分析，提出一种合理的铁芯叠片物理模型。



3、电机的电磁激振力分析

电机几何模型

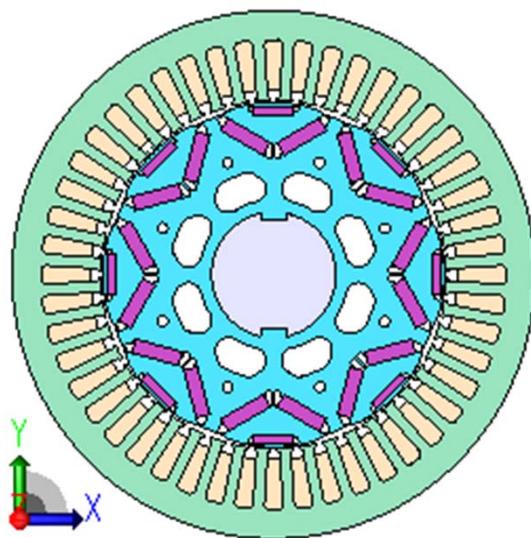
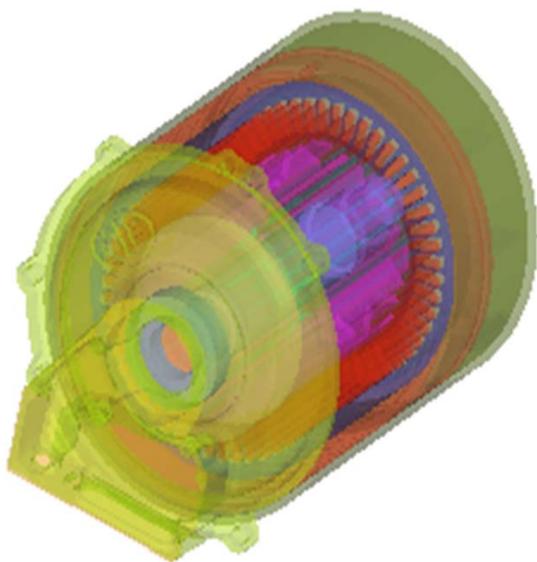


图1 电机的3D总成几何模型

图2 电机的2D横截面几何模型

表1 电机的参数

参数	值
额定母线电压	288V
持续功率	20KW
持续扭矩	120Nm
峰值功率	40KW
峰值扭矩	260 Nm
转速范围	0~7600rpm
定子绕组相数	3相
定子绕线方式	单层绕组
定子绕组联结方式	星型接法
定子槽数	48槽
极对数	4极
铁心长度	140mm
定子外径	200mm
气隙长度	0.7

3、电机的电磁激振力分析

电机的电磁场分析

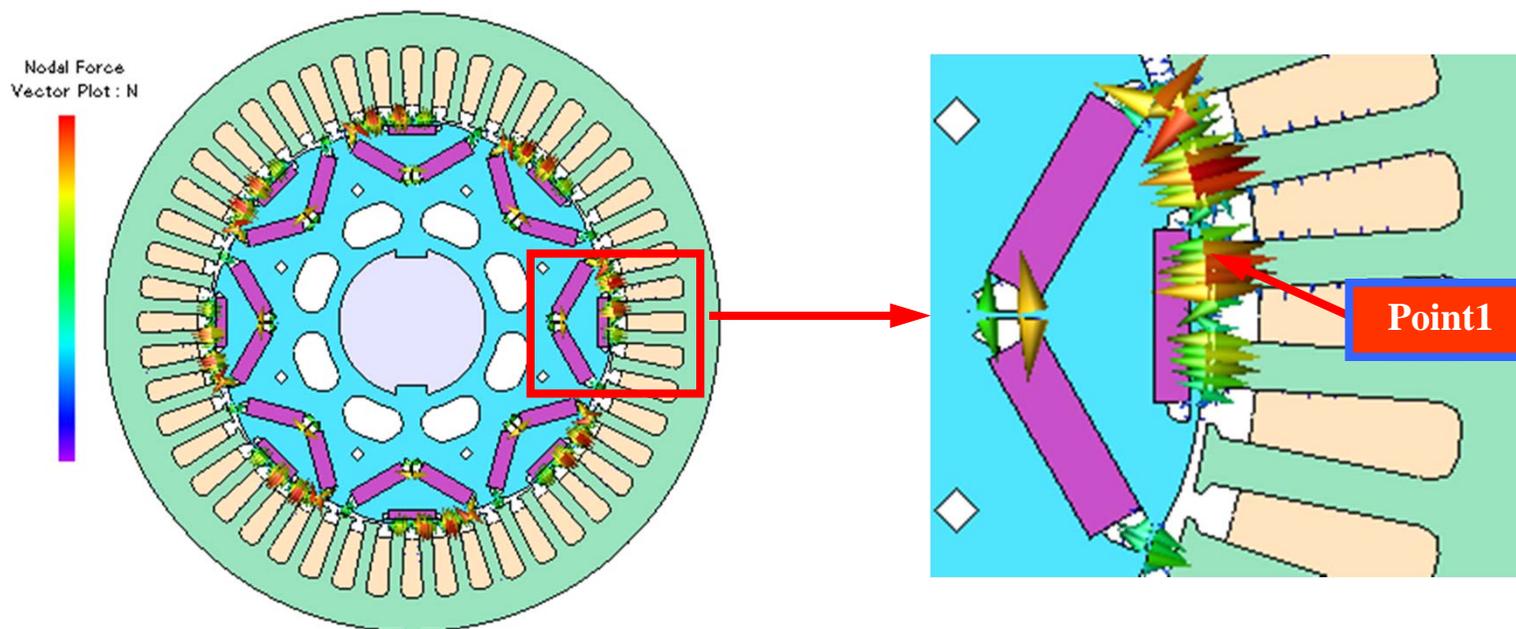


图3 电机的电磁力矢量图

可以获得电机在时域和空间域上的电磁力

3、电机的电磁激振力分析

电机的电磁力分析

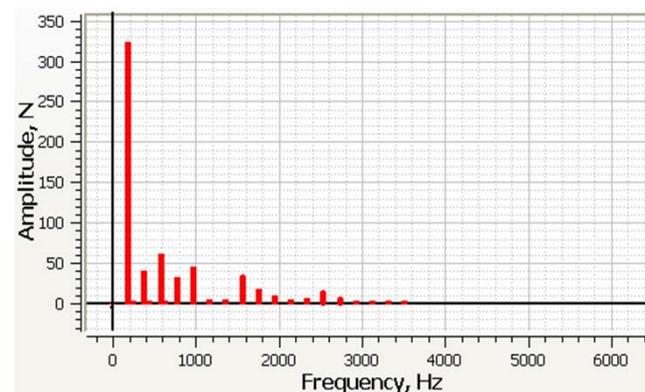
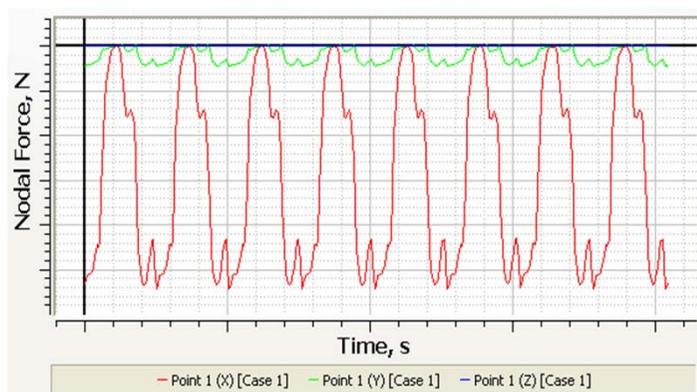
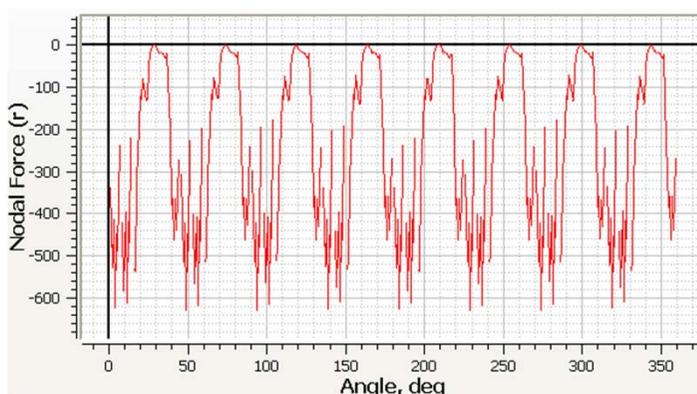


图4 电机测点电磁力的时间曲线分布及谐波分量图



频率 (Hz)	195.9	391.7	587.6	979.3	1175.2	1371.1	2325.9	4676.3
含量比 (%)	100	19.1	17.0	13.2	33.3	24.3	10.8	10.9

图5 电机定子齿端电磁力的空间曲线分布及谐波分量

识别定子电磁力的谐波成分主要因素

4、电机的结构响应分析

电机的模态试验

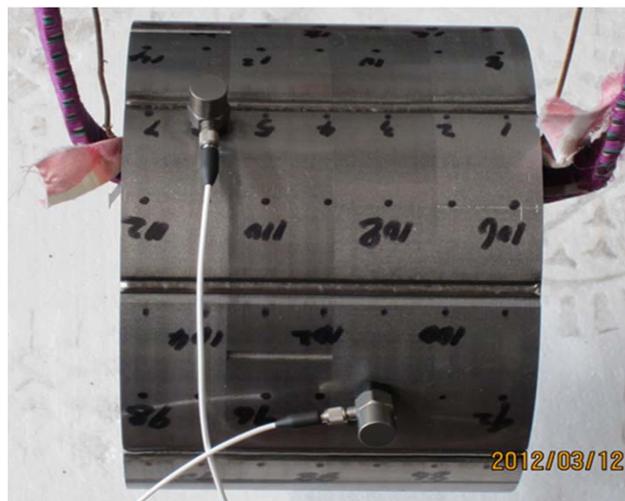


图6 电机定子及总成的模态测试图

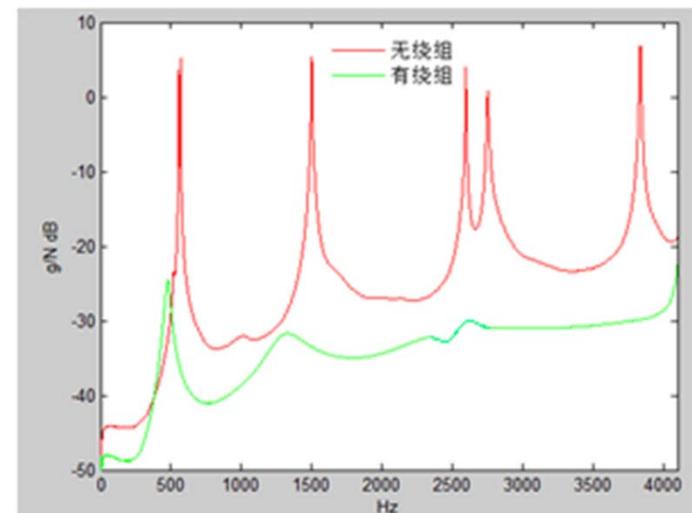
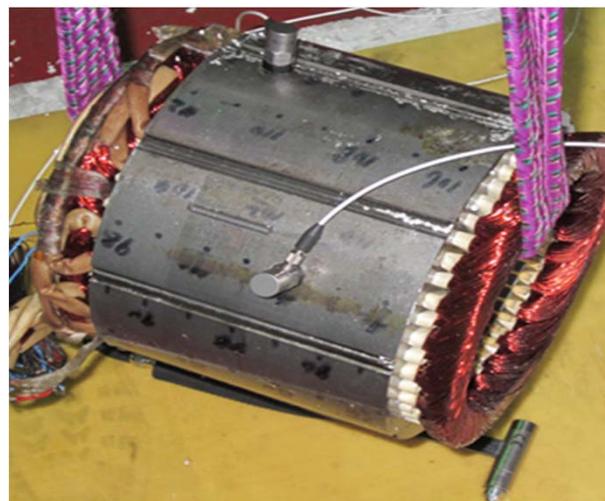


图7 电机测点的FRF曲线对比

获得电机零部件及总成的模态参数、阻尼系数等

4、电机的结构响应分析

电机铁芯叠片结构力学参数关系

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 D_{1111} &= E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\Gamma \\
 D_{2222} &= E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\Gamma \\
 D_{3333} &= E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\Gamma \\
 D_{1122} &= E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})\Gamma \\
 D_{1133} &= E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})\Gamma \\
 D_{2233} &= E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})\Gamma
 \end{aligned}$$

$$D_{1212} = G_{12}$$

$$D_{1313} = G_{13}$$

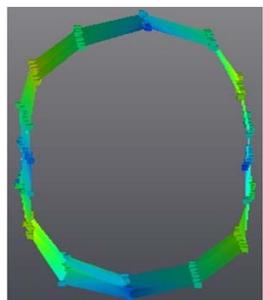
$$D_{2323} = G_{23}$$

$$\begin{aligned}
 E_1 = E_2 = E_p, \quad \nu_{31} = \nu_{32} = \nu_{tp}, \quad \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{pt}, \\
 \nu_{tp} / E_t = \nu_{pt} / E_p, \quad G_{13} = G_{23} = G_t, \quad G_p = E_p / 2(1 + \nu_p),
 \end{aligned}$$

正交各向异性材料的物理参数关系

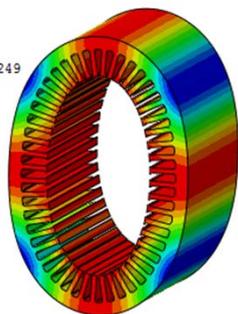
4、电机的结构响应分析

定子铁芯模态的试验与仿真对比

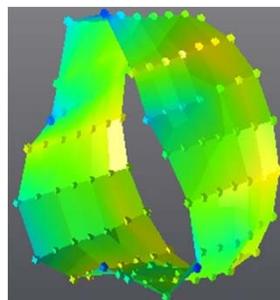


f=567 Hz

STEP=1
SUB =7
FREQ=560.249

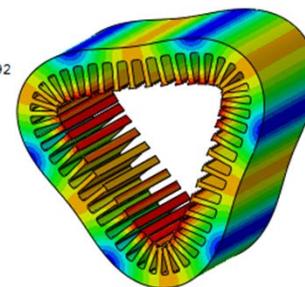


f=560z

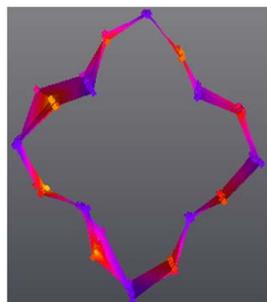


f=1500 Hz

STEP=1
SUB =11
FREQ=1492

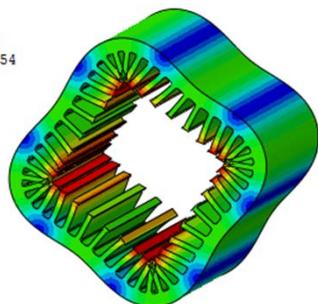


f=1492z

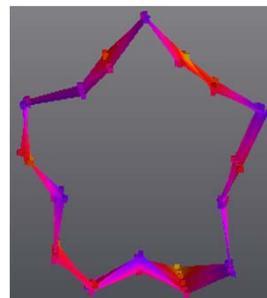


f=2592 Hz

STEP=1
SUB =15
FREQ=2654

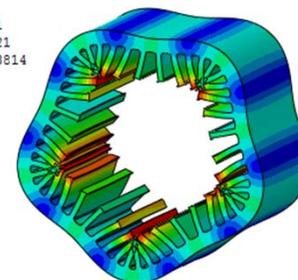


f=2654 Hz



f=3832 Hz

STEP=1
SUB =21
FREQ=3814



f=3814z

图8 定子铁芯模态的试验与仿真结果对比

叠压方向弹性模量仅为平面内的1/30，且随叠压系数变化

4、电机的结构响应分析

电机的结构响应分析

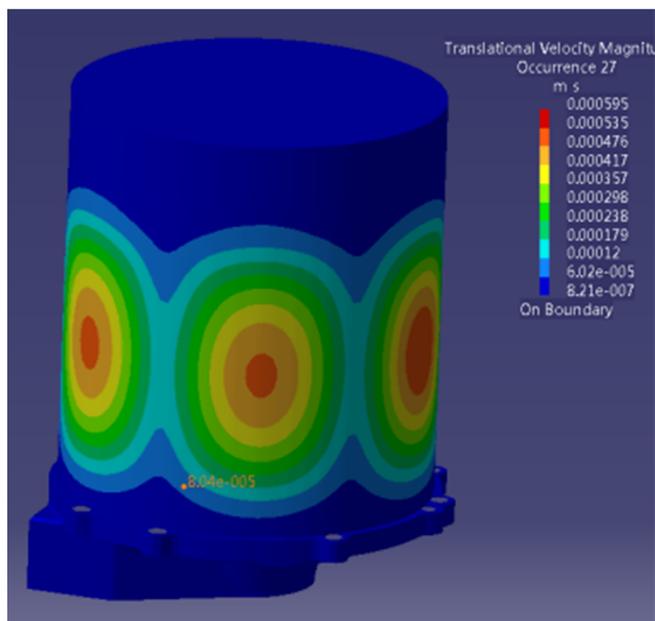


图9 电机的表面振动速度级云图

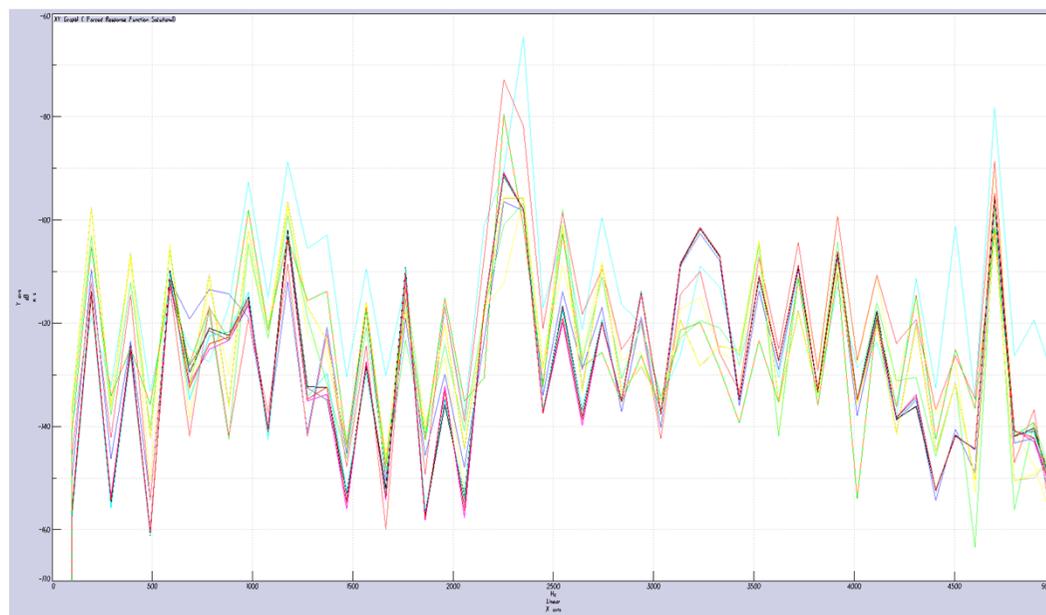


图10 电机测点的表面振动速度级频谱

获得电机结构的动态特性和实际响应关系

5、电机的辐射噪声分析

电机的多元耦合分析模块

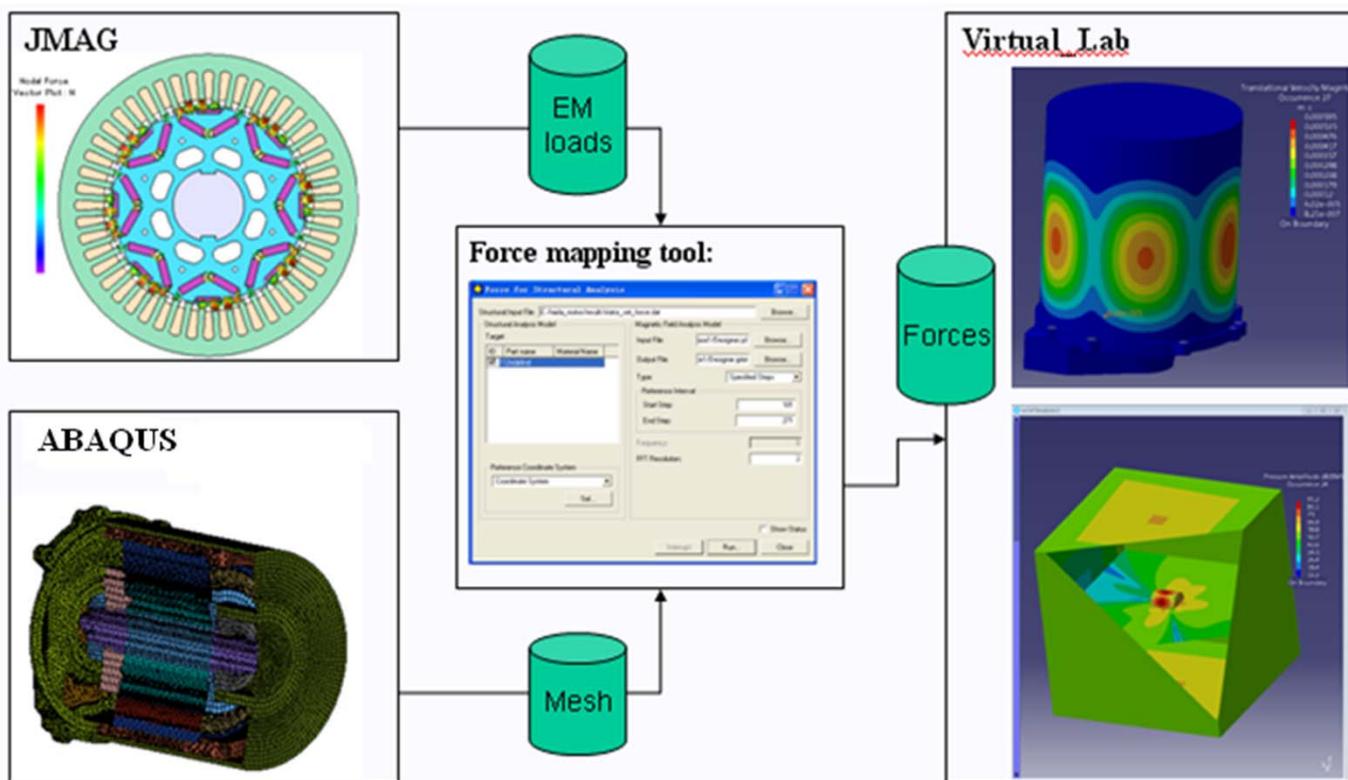


图11 电机的电磁、结构及声学多元耦合数值分析模块

集成JMAG、ABAQUS、Virtual_Lab

5、电机的辐射噪声分析

多元耦合分析模型

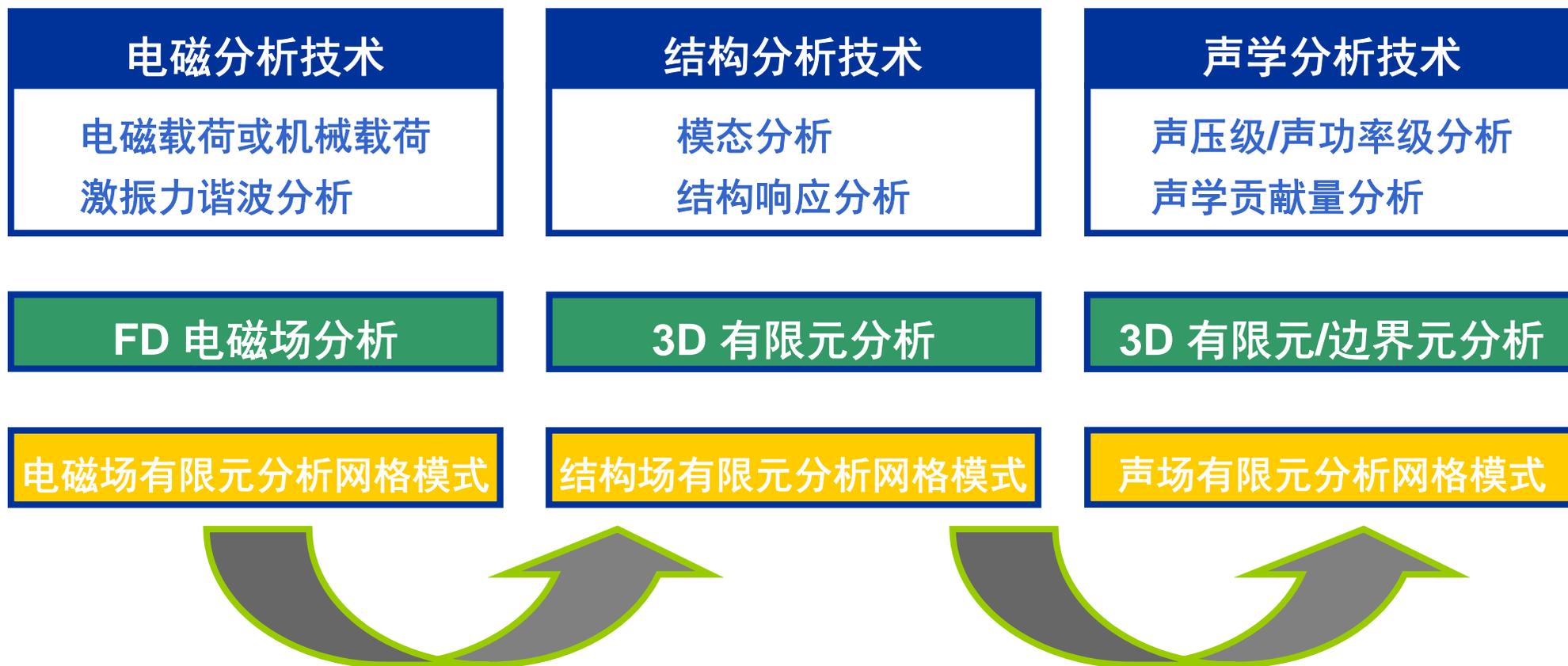


图12 不同物理场分析时建立的有限元模型

提高计算速度和计算精度

5、电机的辐射噪声分析

辐射噪声分析

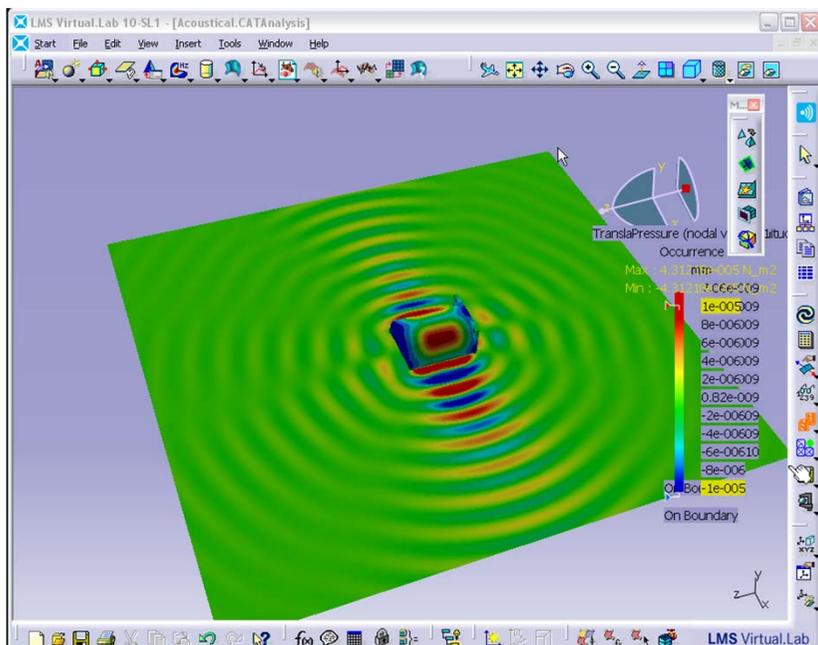


图13 电机的辐射噪声声压级云图

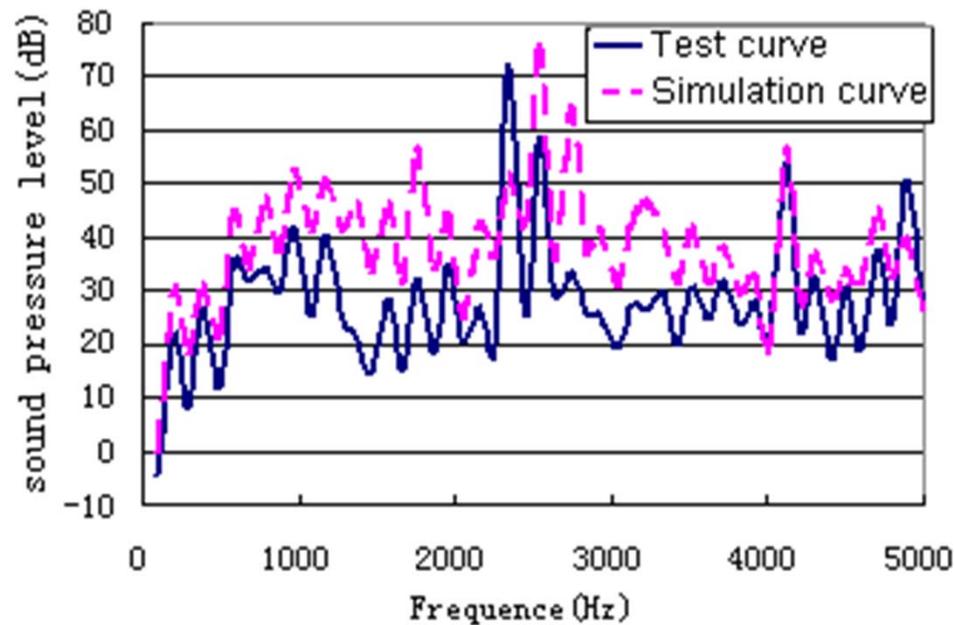


图14 电机测点辐射噪声的声压级频谱

电机测点的辐射噪声声压级频谱分析与试验基本一致

5、电机的辐射噪声分析

辐射噪声分析

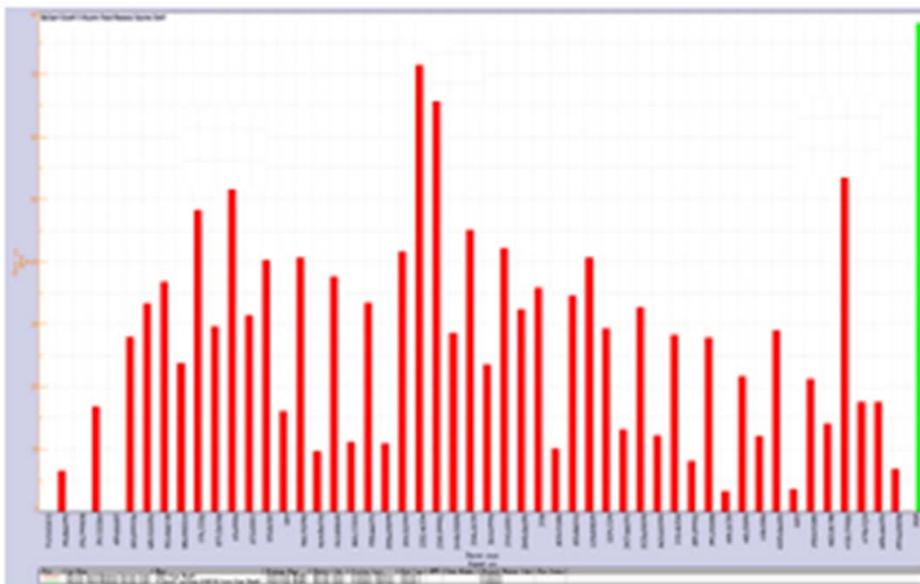


图15 电机的辐射噪声声功率级频谱

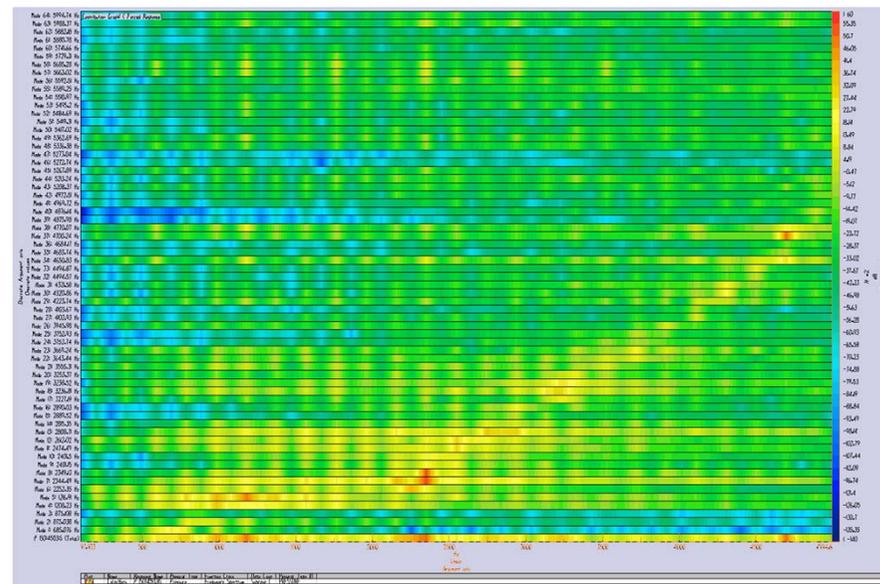


图16 电机1米测点处模式的声学贡献量频谱

评价、反馈和优化电机设计

6、结论

- 1) 该电机在空间和时间上的力波都存在较多谐波含量，不利于电机的振动和噪声，为了实现低噪声电机设计，需要重新合理优化该电机的电磁方案，尽量减少力波的谐波成分及幅值。
- 2) 通过弹性正交各向异性材料的本构关系可以近似模拟电机定子铁芯叠压结构的力学特性，通过与试验对比，其计算精度已达到工程需求。
- 3) 该电机的辐射噪声峰值集中在2500Hz左右，结合电机定子总成在圆周方向的振型及频率，可以得知该峰值主要是因为定子铁芯的第四阶固有频率与激振力的谐波频率相近，导致定子总成共振产生。因此，可以通过改善定子铁芯的装配工艺，使主要结构件的固有频率偏离激振力频率，或添加阻尼措施等，从而达到低噪声电机设计的目的。

6、结论

- 4) 该研究提供了电机叠片结构的非线性力学特性拟合方法，为建立永磁同步电机零部件的材料数据库提供了方法，为电机的振动、噪声及可靠性分析提供了有效的数据。
- 5) 该研究提供了一种电机在时域和频域内电磁、结构和声学的耦合分析方法，能快速对电机进行振动噪声性能预测和评价，减少样机试制、台架试验所需的人力和物力。



关爱自然 服务社会

CARE THE NATURE AND SERVE THE SOCIETY

——让汽车更清洁 更节能

Contribute cleaner and more energy saving vehicles

谢谢!

