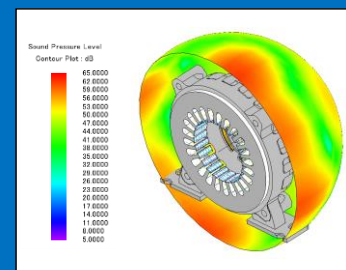
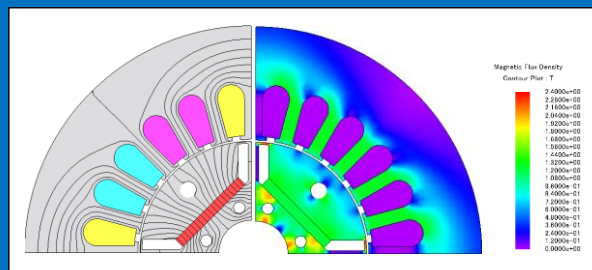
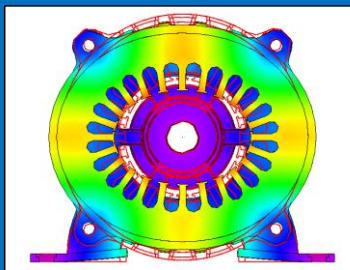




心於至善

计及驱动策略的永磁电机电磁噪声计算分析



郭保成 博士
黄允凯 教授 博导
东南大学电气工程学院

报告来源：2019年IDAJ中国CAE/MBD 技术大会

团队介绍



黄允凯 教授 博导

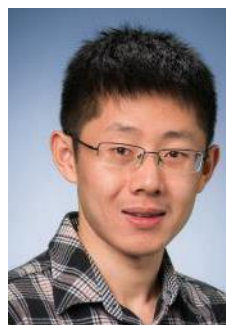
东南大学 教授

主要从事：

电机设计与分析

大功率高速永磁电机研究

高效电机控制与分析



彭飞 博士 讲师

McMaster 博士

东南大学 讲师

主要从事：

电力电子设计与分析

电机无位置控制



郭保成 博士/博士后

东南大学 博士/博士后

主要从事：

轴向磁通永磁电机设计与分析

电机内多物理场分析计算

研究领域

大功率永磁风力
发电机设计控制

电动汽车宽调速
永磁电机系统

高精度伺服电机
设计与控制

高速永磁电机设
计与控制

热管理与分析

机械结构设计

振动噪声与心理
声学

新型高效
能永磁电
机

电机多
物理场
分析

永磁
电机



计及驱动策略的永磁电机电磁噪声计算

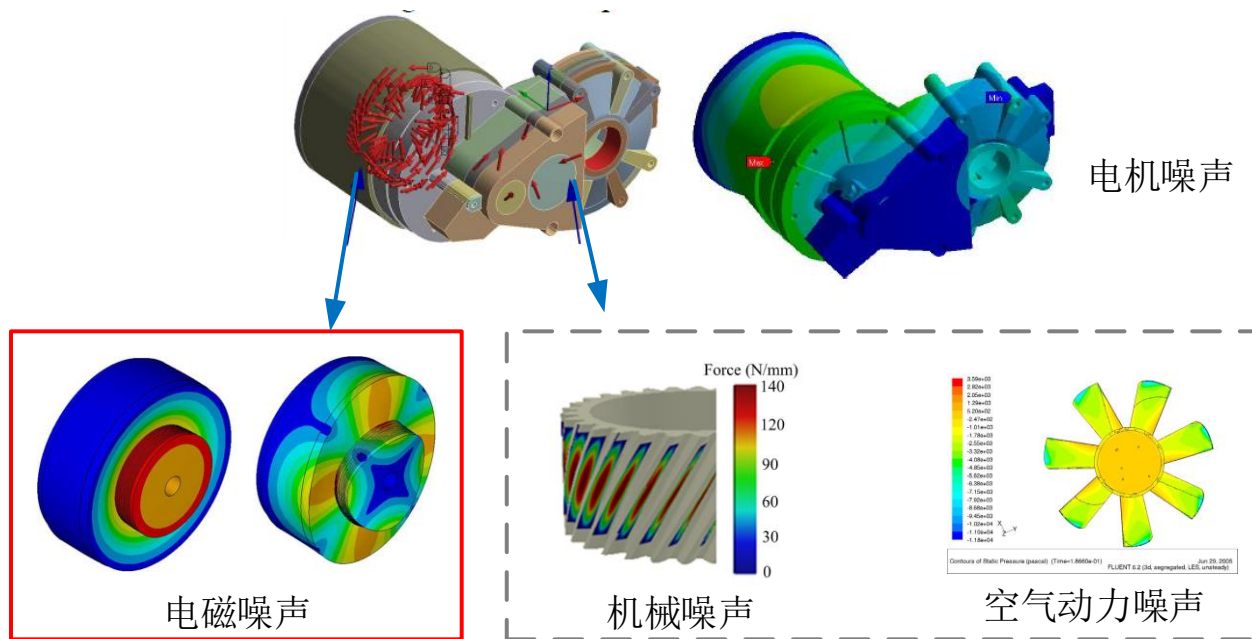
- A. 基本介绍
- B. 电磁振动噪声基本理论
- C. 案例：PAM驱动的内嵌式永磁电机
- D. 模态分析与噪声计算
- E. 课题组相关研究



A. 基本介绍



- 电机在日常生活中的应用越来越广泛，且对电机振动噪声的标准提出更高的要求(运输、家庭、工业、能源领域)
- 电机噪声由三种噪声组成：



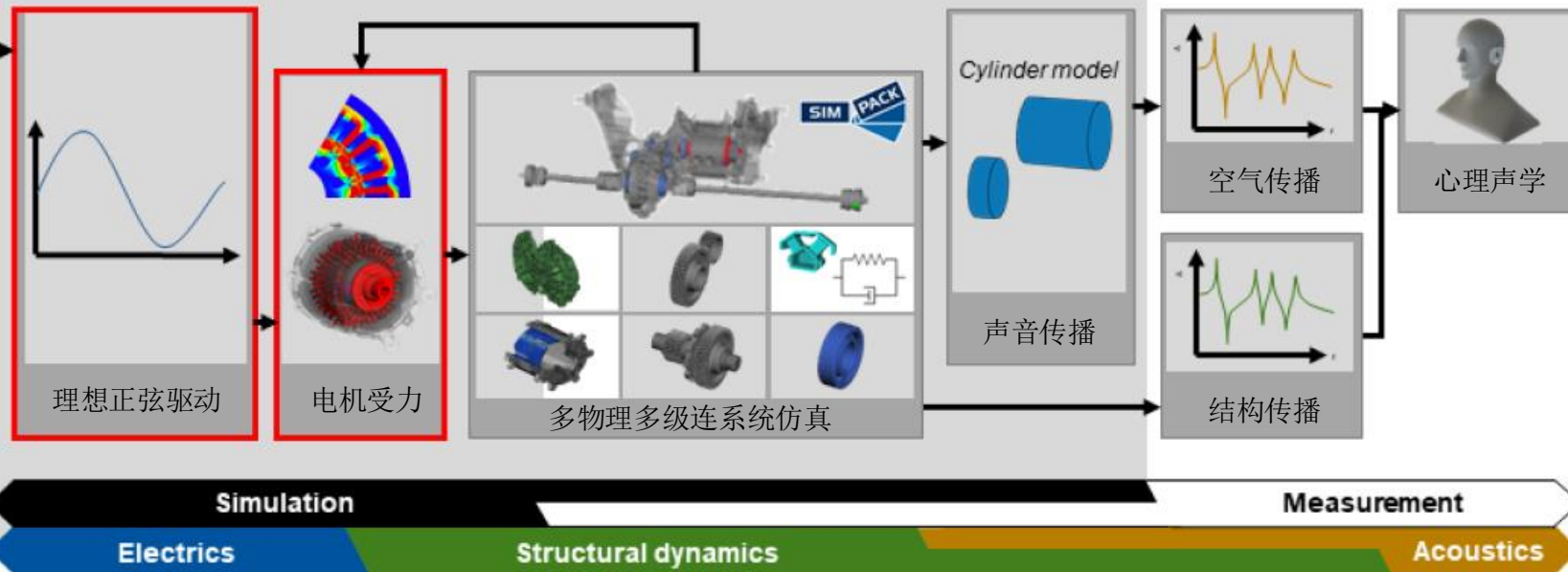
- 越来越多的标准开始限定电机的振动噪声水平
- 研究与模拟噪声现象，从本质阶段将其进行整合
- 力-振动-噪声



- 建立多物理场，多级连系统级模型；
- 开发电机振动噪声计算与优化软件。

Driver's wish

多物理场混合系统模型



验证过程



B. 电磁振动噪声基本理论



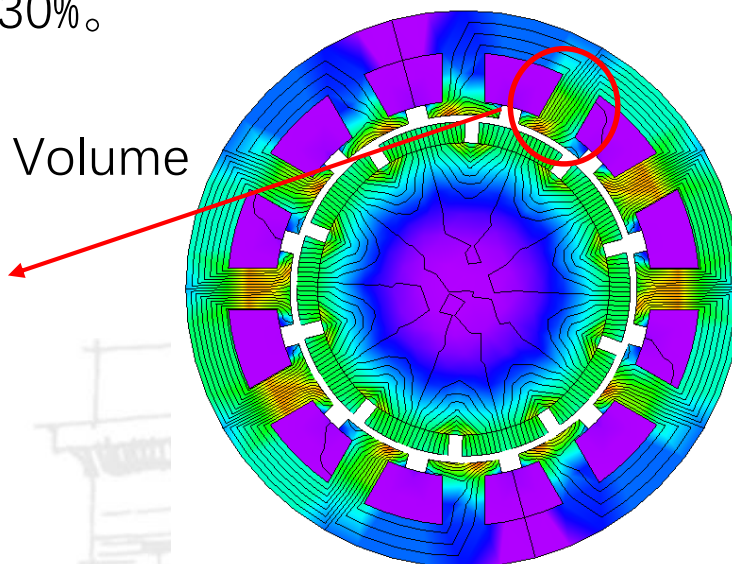
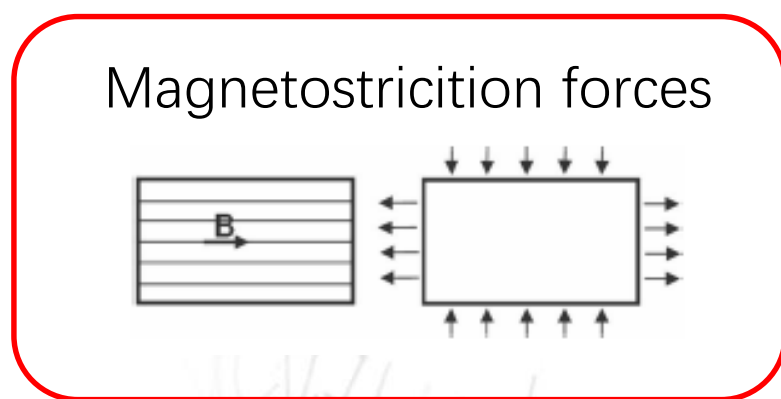
电机内电磁作用力：

$$f_i = [\text{div}(Y)]_i + [j \times B]_i - \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^3 H_j H_k \partial_i \mu_{jk} - \frac{1}{2} [\text{rot}(H \times B)]_i + [\text{div}(\phi)]_i + [\text{div}(\psi)]_i$$

1. $Y = C(\varepsilon)$ 为机械应力，遵循胡克定律（Hooke' s Law）；
2. $j \times B$ 为洛伦兹力，作用于裸露在磁场中的铜线，也被称为Laplace力；
3. $-\frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^3 H_j H_k \partial_i \mu_{jk}$ 为磁导异性产生的作用力，不受磁场密度的影响；
4. $-\frac{1}{2} [\text{rot}(H \times B)]_i$ 为转矩力；
5. ϕ 为磁致伸缩力；
6. ψ 为热应力。



- 磁致伸缩力包括：
 - 本征磁致伸缩力（各项同性）： $B > 8 \text{ kA/m}$ 下产生，叠压铁芯可忽略；
 - 磁通磁致伸缩力（各向异性）：磁场变化剧烈下，例如变压器铁芯；
- 磁致伸缩力作用于磁力线方向，使材料有收缩现象的产生；
- 磁致伸缩力与磁通密度的平方成正比；
- $\sim 1\text{-}10 \text{ } \mu\text{m/m}$;
- $> 1500\text{Hz}$ 电机磁致伸缩噪声占10%~30%。



将Eq.中2、3、4项合并，既是麦克斯韦力（Maxwell Tensor）：

$$T_{ij} = \frac{1}{2}(H_i B_j + H_j B_i - \sum_{k=1}^3 \sigma_{ij} B_k H_k)$$

$$\sigma_t = T_{23} = \mu H_n H_t$$

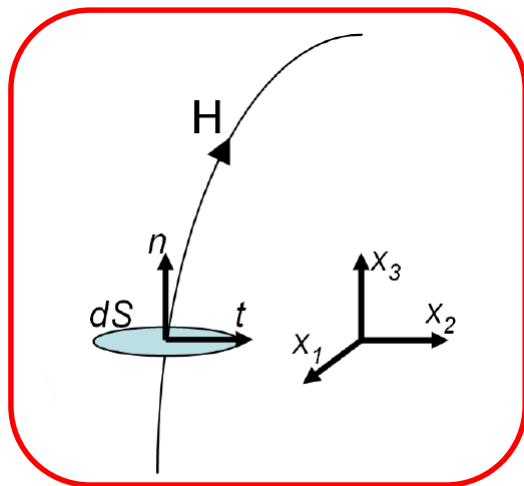


转矩：齿槽/输出转矩

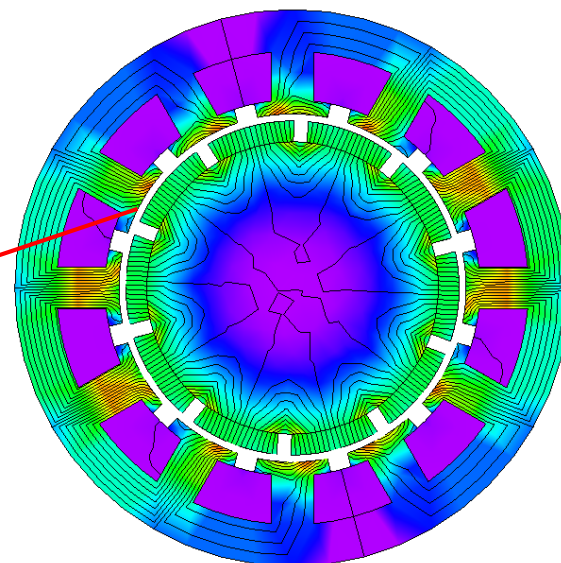
$$\sigma_n = T_{33} = \frac{1}{2} \mu (H_n^2 - H_t^2)$$



力：振动噪声



Surface

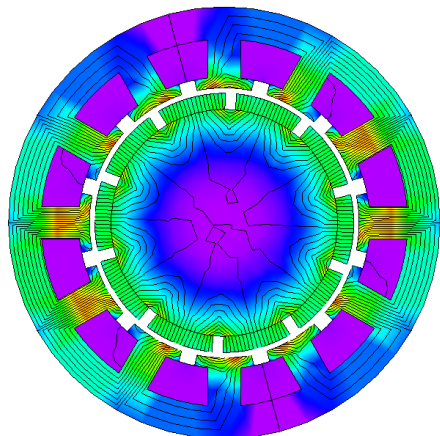


• 气隙磁场基础表达式：

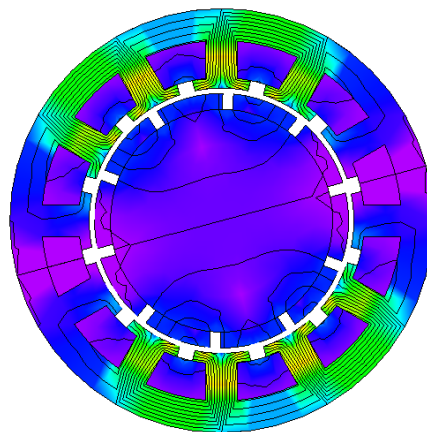
$$B_h = (1 + K_{se})(1 + K_{de}) \underbrace{(P_0 + P_s + P_r + P_{sr})}_{\text{基础与齿槽相对磁导}} + P_a \underbrace{\times [(N_0^s + N_h^s)(i_0^s + i_n^s) + (N_0^r + N_h^r)(i_0^r + i_n^r)]}_{\text{定子磁场} \quad \text{转子磁场}}$$

静、动偏心系数
饱和系数

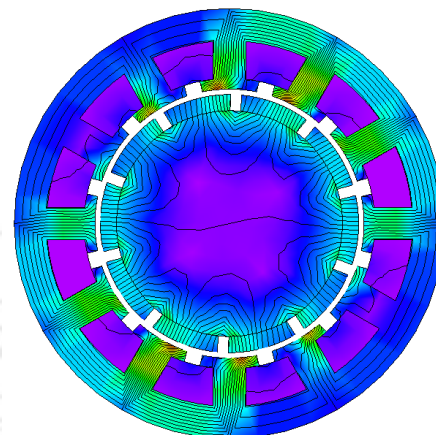
- 为简化计算，采用场重组技术进行理论分析，做出如下假设：
 - 忽略电机静、动偏心情况；
 - 忽略电枢与永磁组合后的铁芯饱和；



转子磁场(空载)



电枢磁场



负载磁场

- 基本计算式：

$$P(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2(\theta, t) - B_t^2(\theta, t)] \approx \frac{B_r^2(\theta, t)}{2\mu_0}$$



$$\begin{aligned} F_s^{m_s, f_s} &= F_s^{vp, f_n}, \\ F_r^{m_r, f_r} &= F_r^{up, u f_n} \\ \lambda^{m_{\lambda}, f} &= \lambda_0 + \lambda_{ks}^{kZs, 0} + \lambda_{kr}^{2kp, 2kf_s} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} P^{m, f} &= \frac{1}{2\mu_0} \left[\lambda^{m_{\lambda}, f} (F_r^{m_r, f_r} + F_s^{m_s, f_s}) \right]^2 \\ &= \frac{1}{2\mu_0} (\lambda^{m_{\lambda}, f})^2 \times (F_r^{m_r, f_r})^2 \\ &\quad + \frac{1}{2\mu_0} (\lambda^{m_{\lambda}, f})^2 \times (F_s^{m_s, f_s})^2 \\ &\quad + \frac{1}{\mu_0} (\lambda^{m_{\lambda}, f})^2 \times F_r^{m_r, f_r} \times F_s^{m_s, f_s} \end{aligned}$$



114个表达式！

Important notes :

- 切向分量忽略的条件：

$$\frac{H_{\theta}}{H_r} < \frac{2g}{D} m$$

m：空间基波=p

g：气隙长度

D：气隙外径

由于电机气隙较小，这一条件一般很容易满足。

- 通过计算不同组合，定子所受力可分解出114个表达式，可由以下关系特征进行简化：

$$\begin{aligned} \lambda_{ks}, \lambda_{kr} &\ll \lambda_0 \\ \lambda_{kr} &\ll \lambda_{ks} \\ F_s &\ll F_r \end{aligned}$$

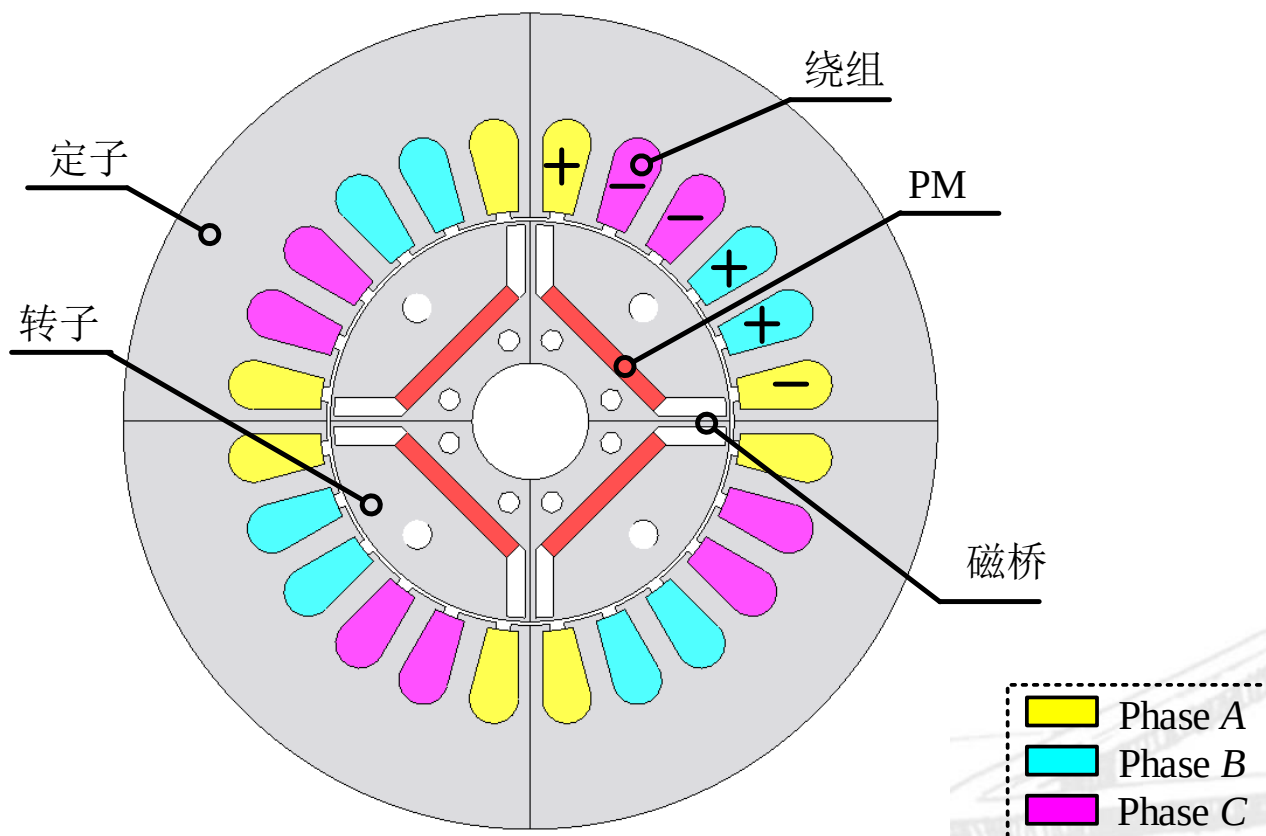


C. 案例：PAM驱动的内嵌式永磁电机



- 电机结构：

- 24槽4极，一字形内嵌式永磁电机；

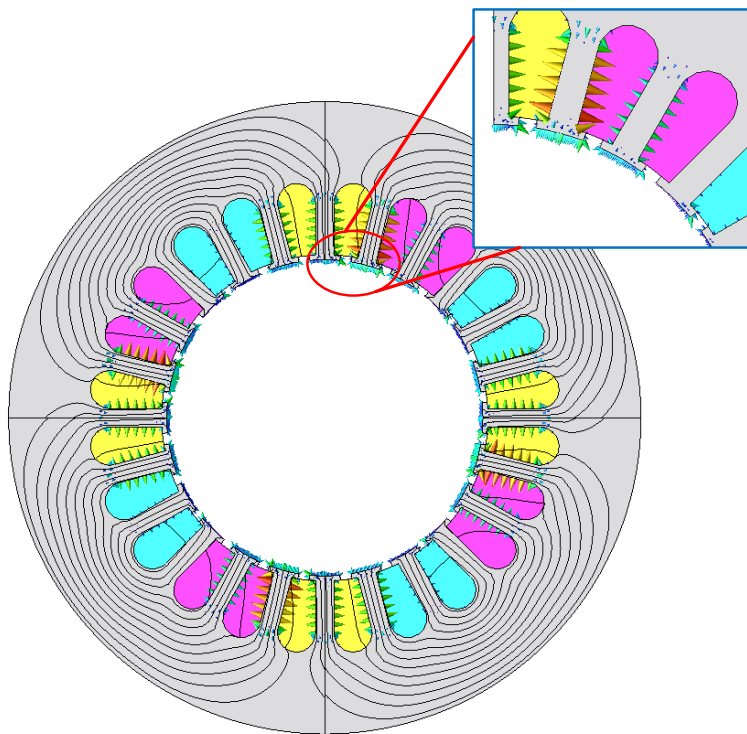


- Source: JMAG Application **JAC240**

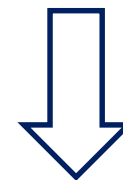


- 定子铁芯电磁力计算：

- JMAG Designer中，‘Nodal Force’ 边界条件：

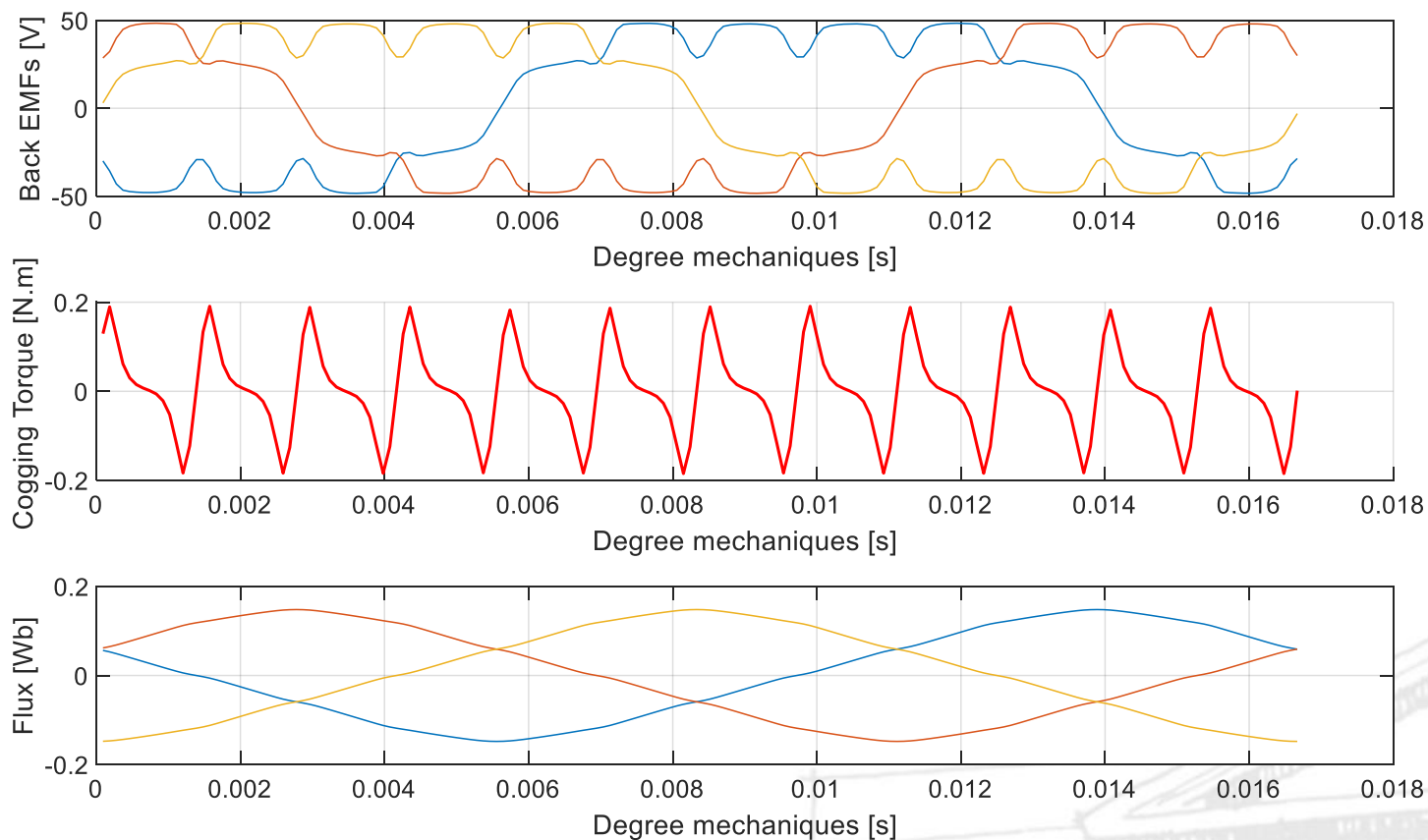


-JMAG中可自行进行傅里叶分解
- 提取气隙中心处磁密

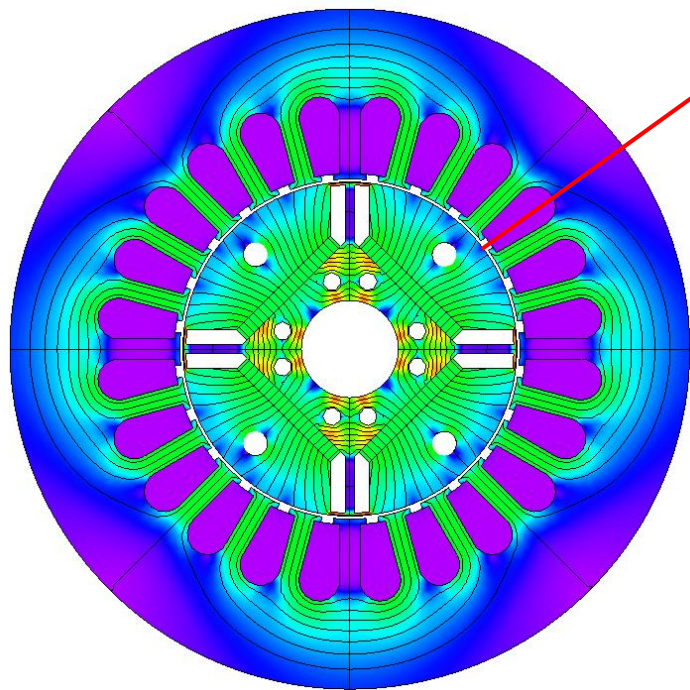


在Matlab/Python环境
中进行后处理分析

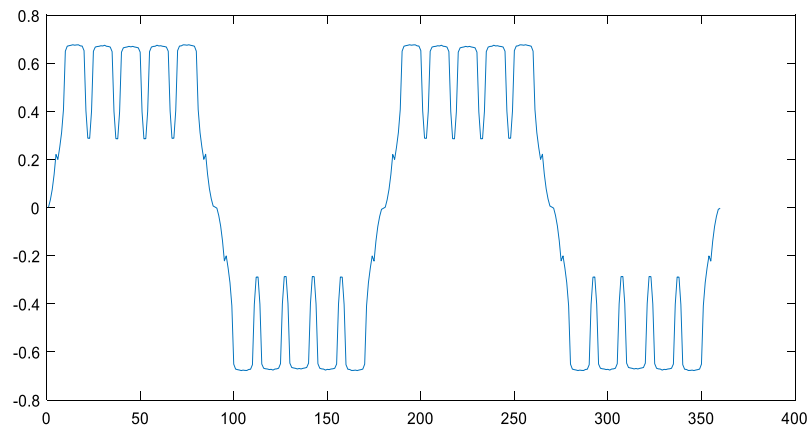
- 基本空载性能：



- 空载磁场：

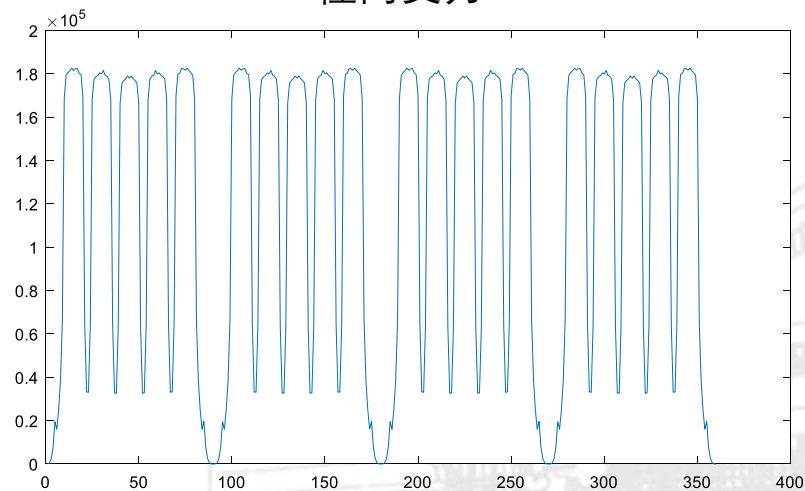


径向气隙磁密

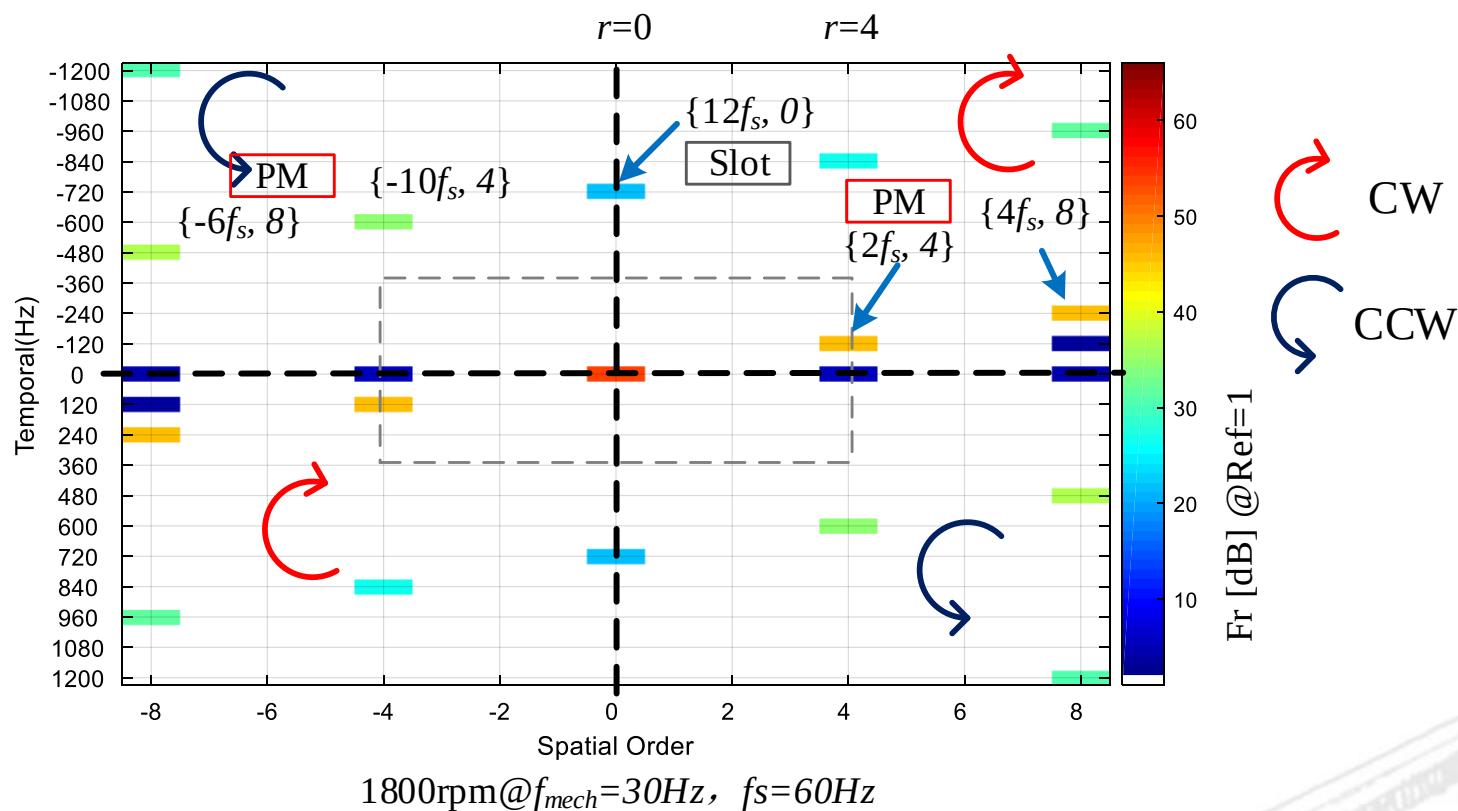


$$p_r = \frac{B_r^2 - B_t^2}{2\mu_0}$$

径向受力



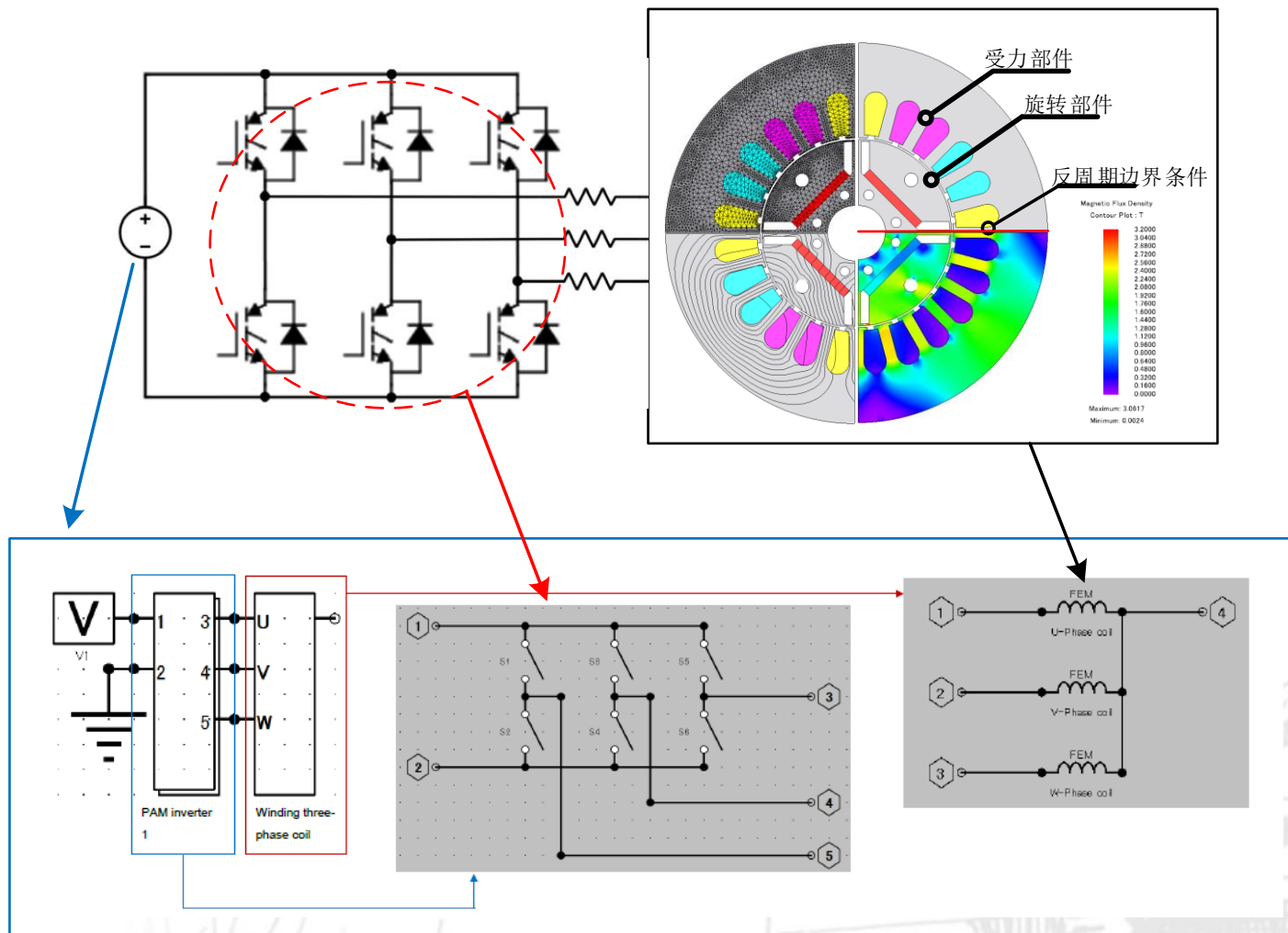
- 空载下受力时空分析：



- $r=0$ 是重要的呼吸模态
- 最小空间模态=4 $r_{min} = \text{GCD}(Zs, 2p)$
- 最小呼吸模态频率, Temporal=12 = $\text{LCM}(Zs, 2p)/p$
- 斜对角对称

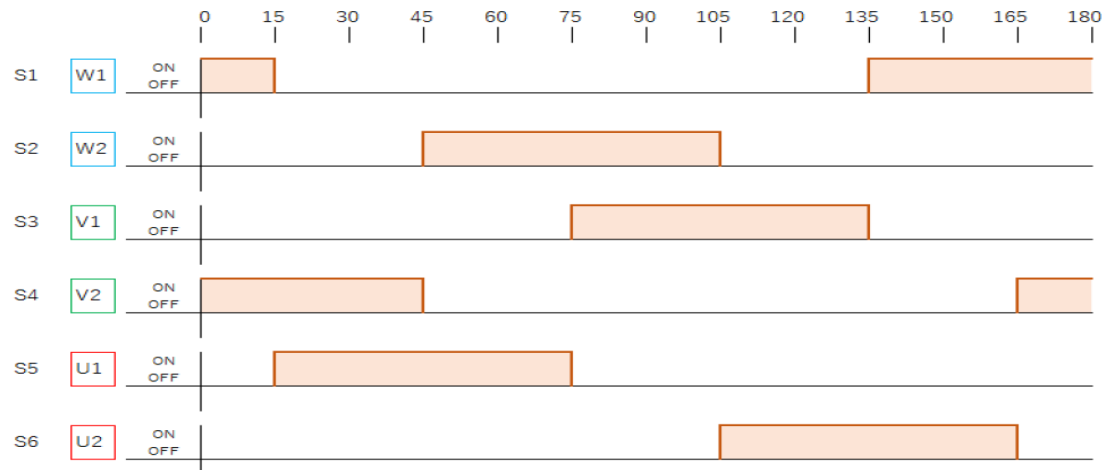


- PAM控制策略：

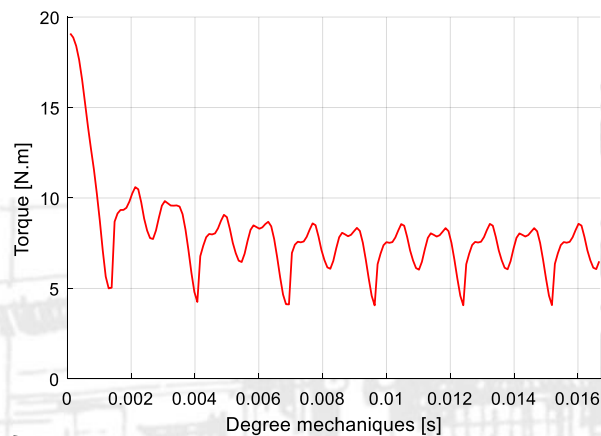
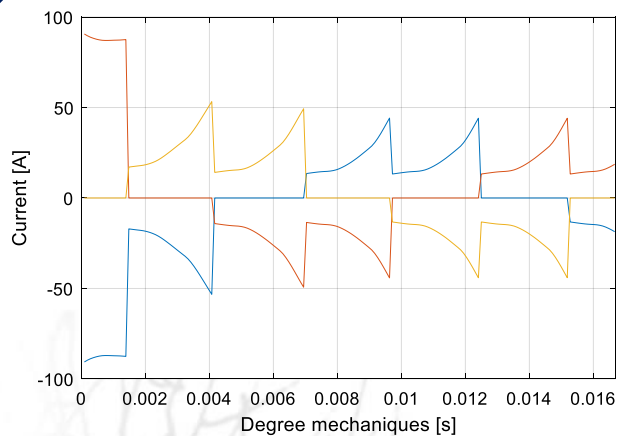
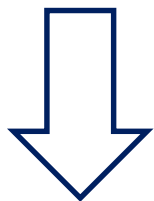


- 负载性能：

- JMAG Designer电路中，设置开关策略：

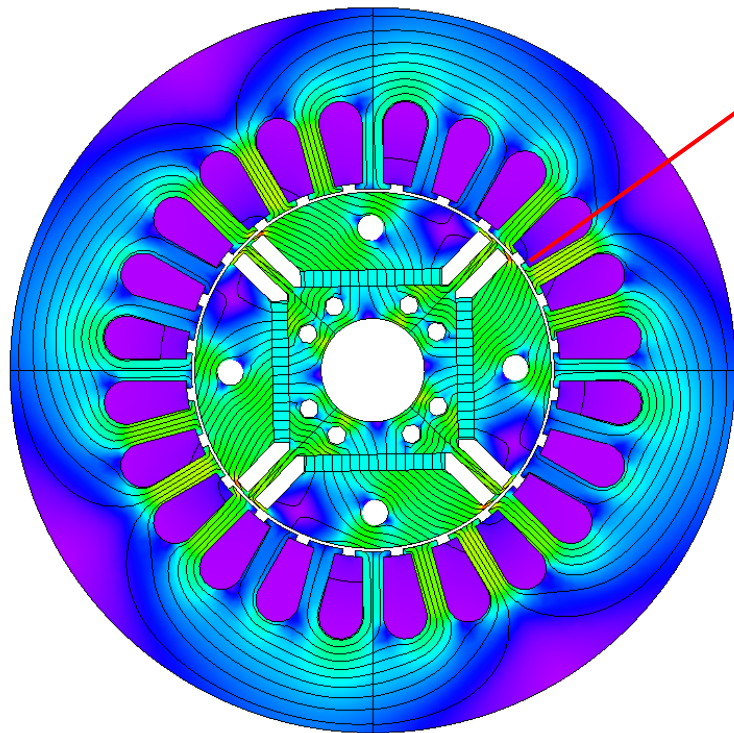


PAM控制策略

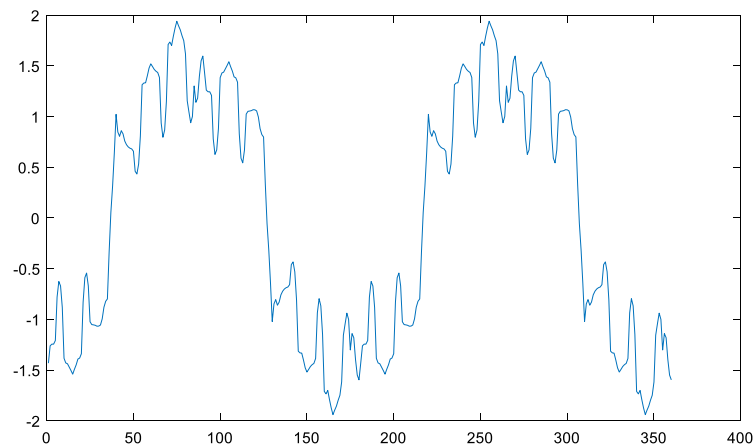


计算结果

- 负载磁场：

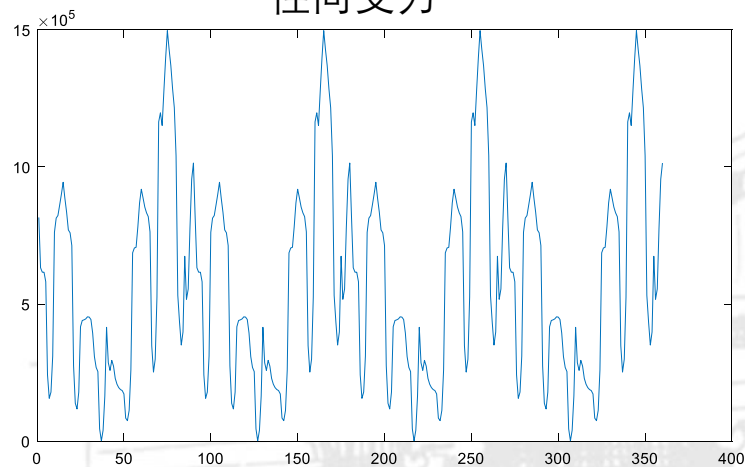


径向气隙磁密

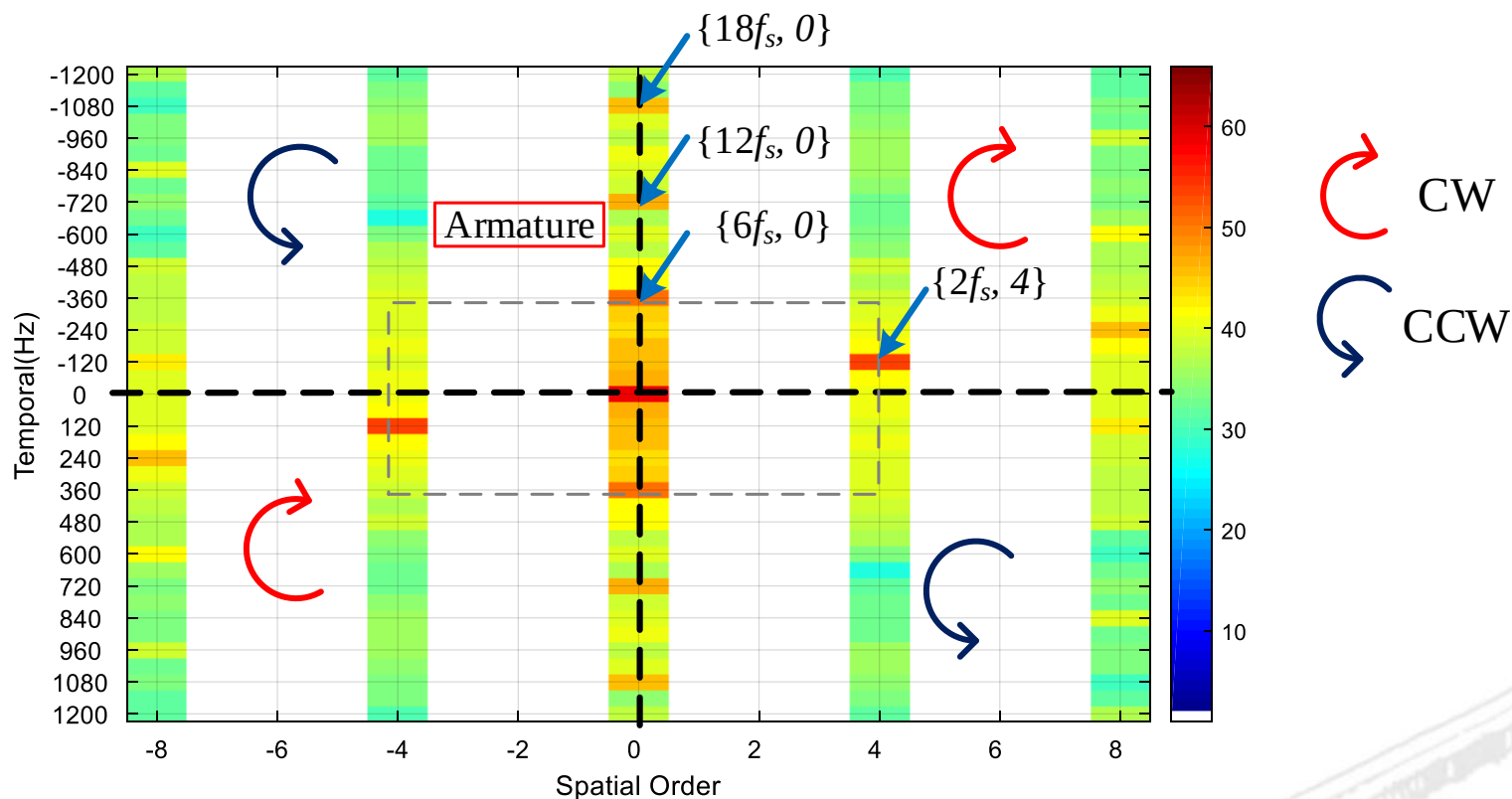


$$p_r = \frac{B_r^2 - B_t^2}{2\mu_0}$$

径向受力



- 负载下受力时空分析：



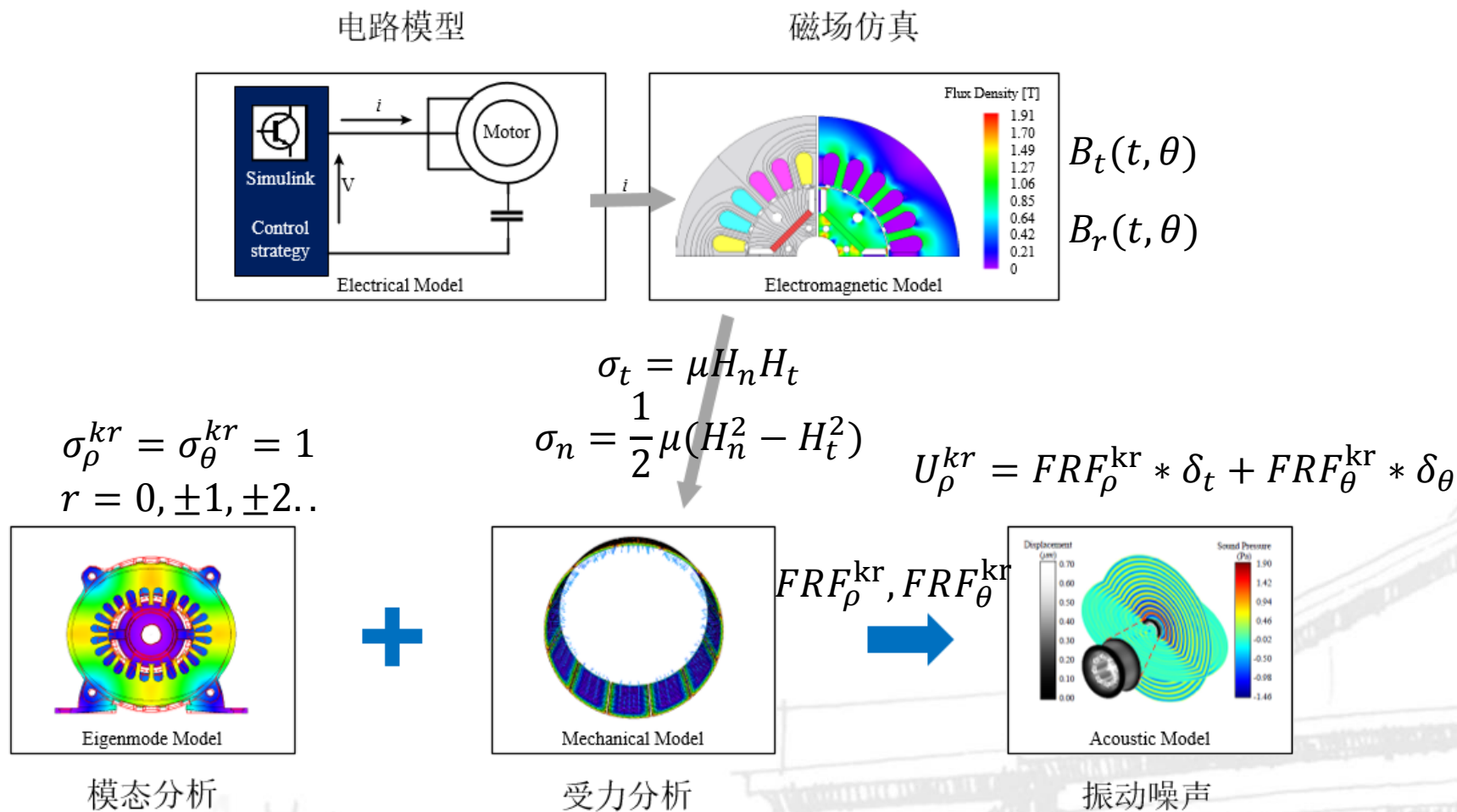
1800rpm@ $f_{mech}=30\text{Hz}$, $f_s=60\text{Hz}$

- 由于电枢反应，新加入0阶 $6f_s$ 空间模态；
- 由于并非正弦控制，绕组磁场下的谐波成分增加；
- 分析电机噪声，要找到受力源进行处理。

D. 模态分析与噪声计算

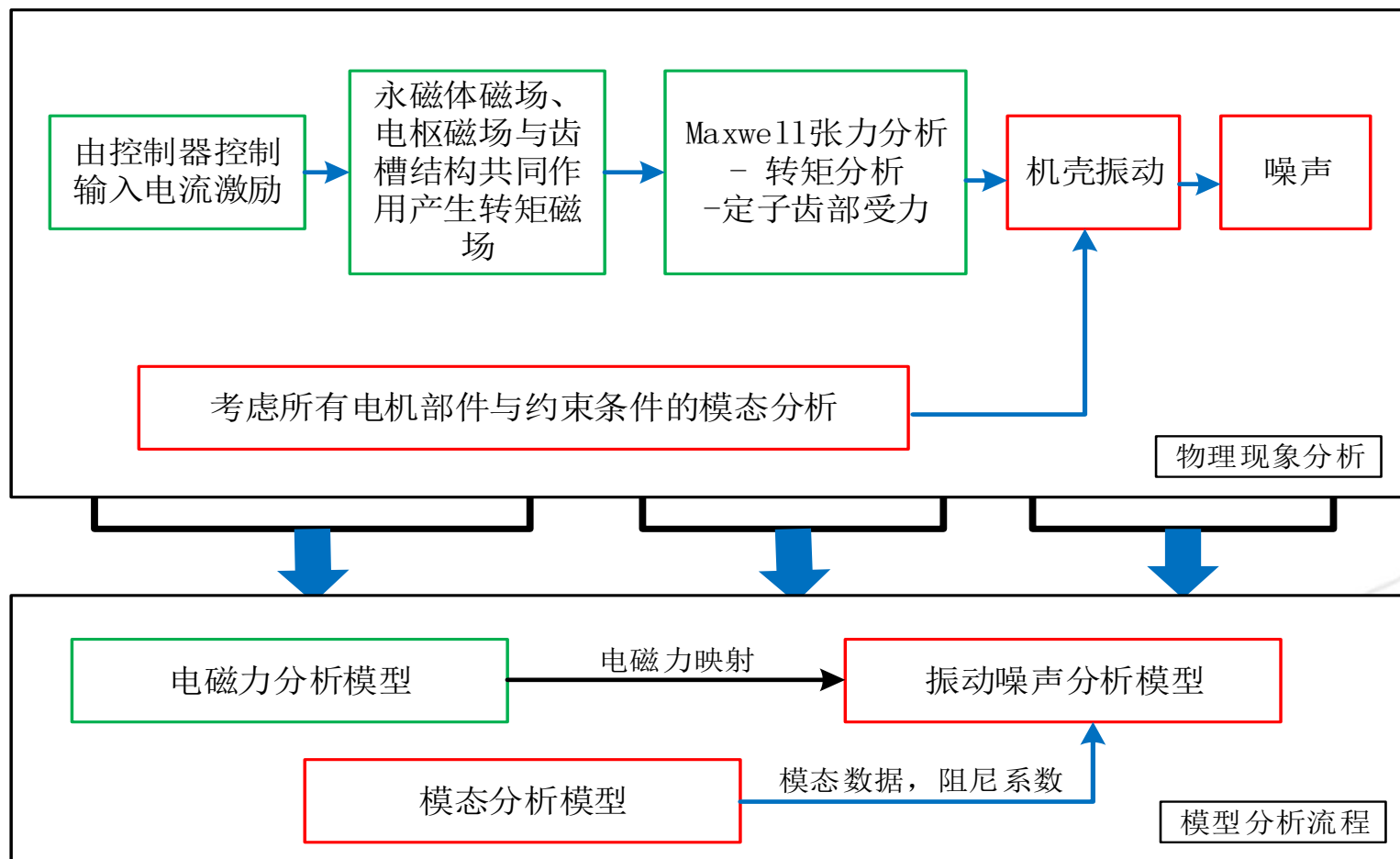


- 分析流程：



• JMAG分析流程：

- JMAG通过构造解析与磁场计算耦合，实现声压解析计算

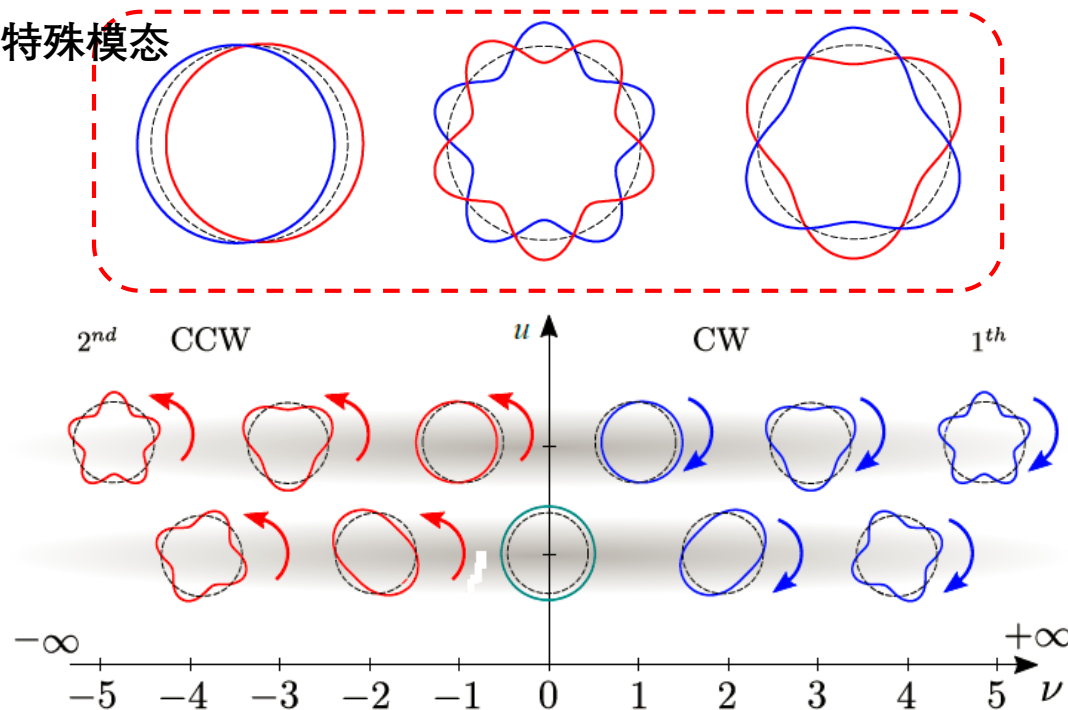


•Source: JMAG Application JAC20

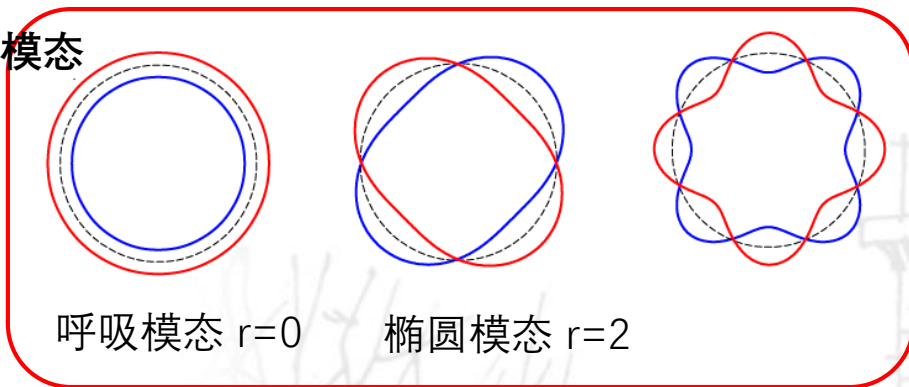


模态叠加法：

特殊模态



有效模态

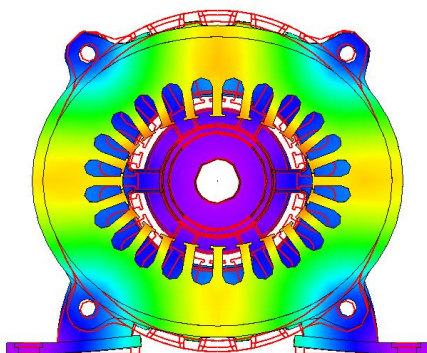
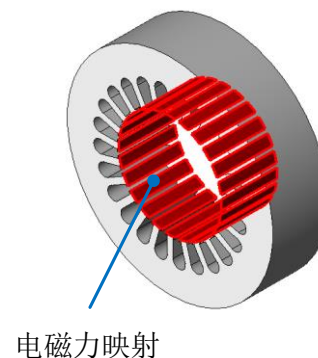
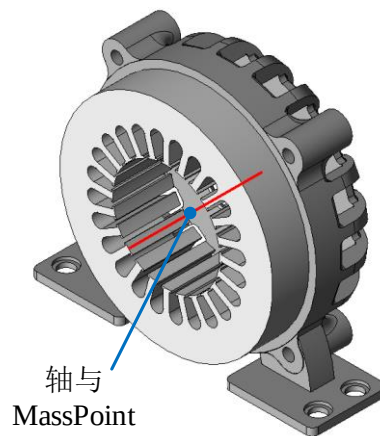
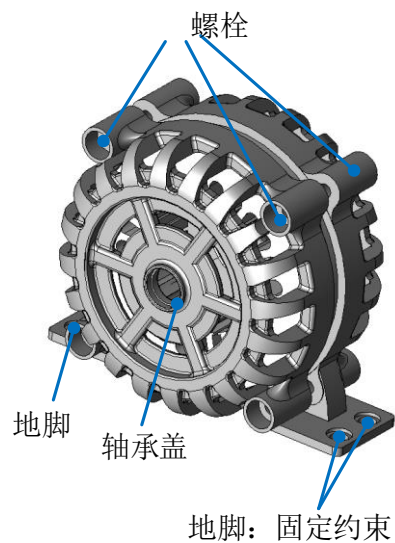


Important notes：

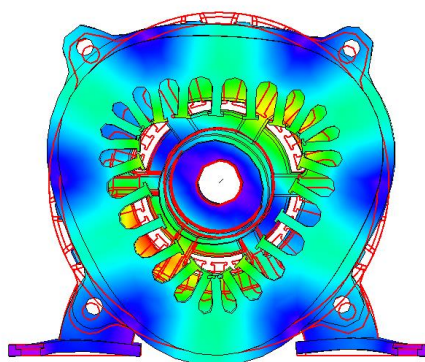
- 各模态所产生的表面位移 Δd 与阶次的四次方成正比：
 $\Delta d \sim 1/r^4$
- 大于8的空间阶次一般被忽略；
- 呼吸模态与 $r=2$ 的椭圆模态一般是电机振动主要贡献模态；
- $r=1,3,5$ 模态主要由不平衡磁拉力产生，例如偏心，具有不平衡磁拉力的极槽配合。
- 最小空间模态
 $r_{min} = GCD(Zs / m, 2p)$

(SOURCE: Callegaro, A. D, and A. Emadi. "Radial Force Density Analysis of Switched Reluctance Machines: The Source of Acoustic Noise." IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018.)

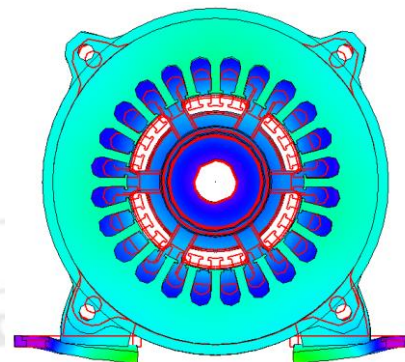
- 机械约束条件与模态计算：



2nd 环形模态
4375 Hz

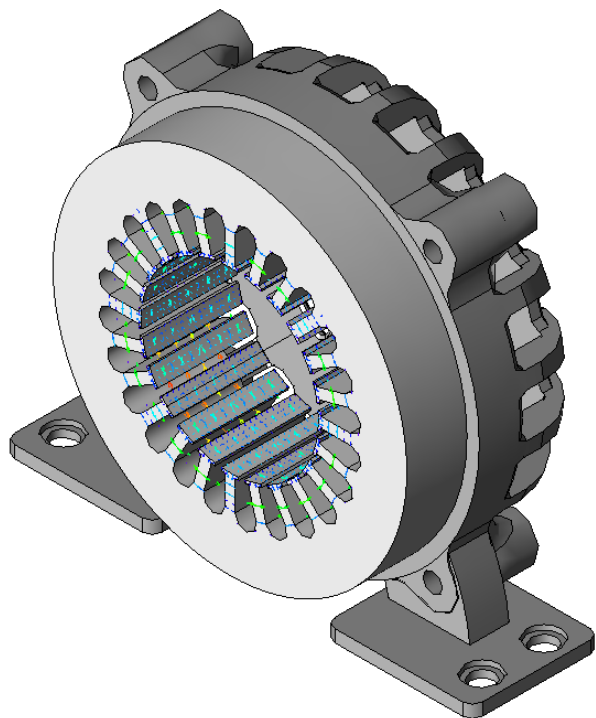


3th 环形模态
9163 Hz



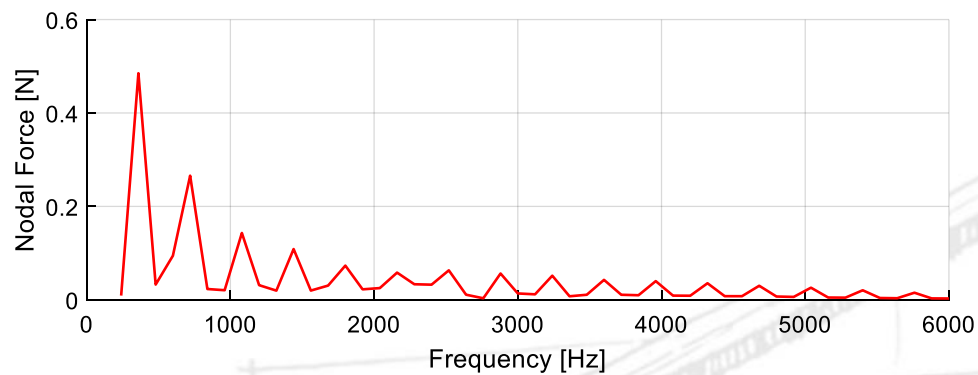
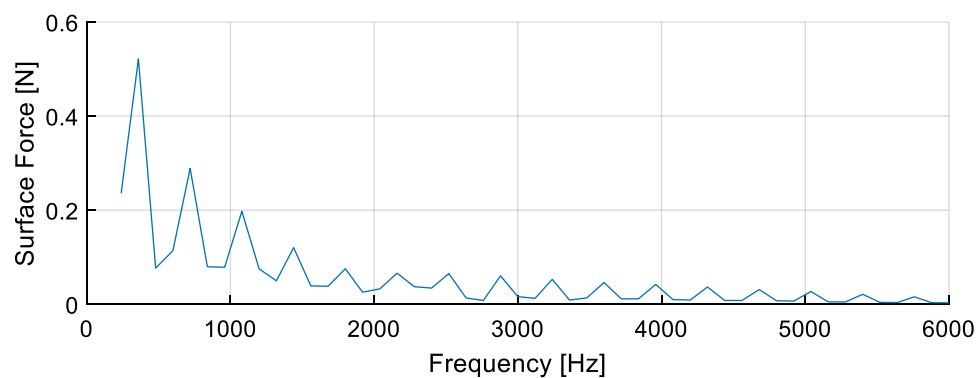
呼吸模态
10k Hz

- 电磁力映射：



电磁力映射结果

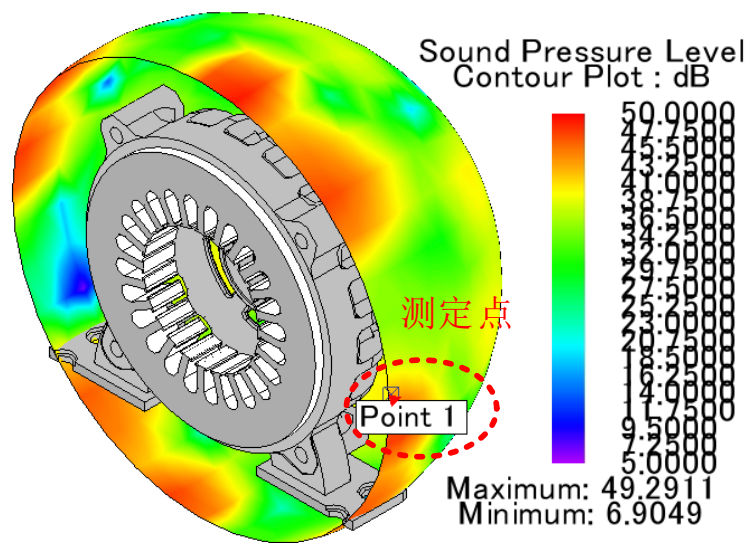
表面电磁力



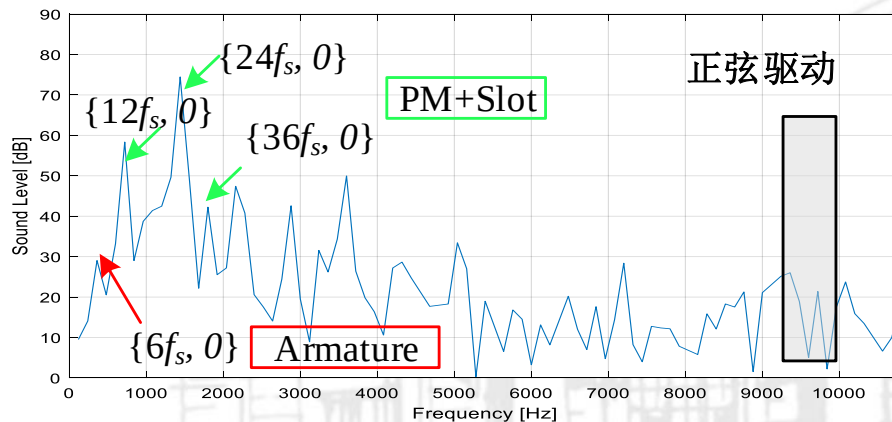
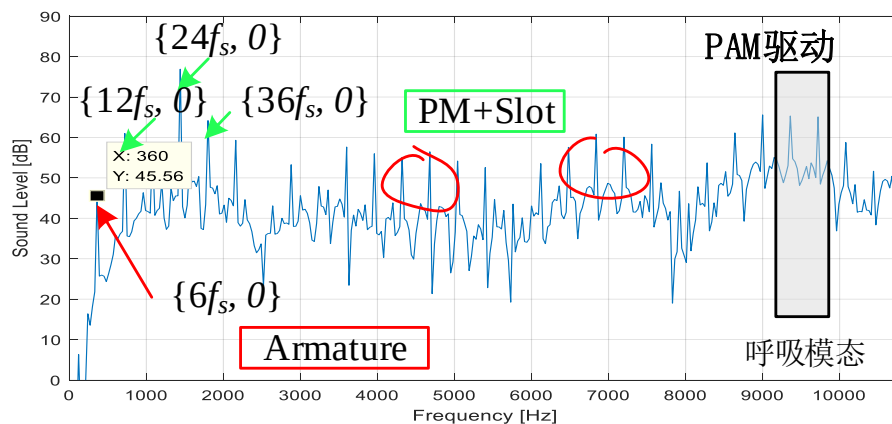
节点电磁力

• 噪声计算结果：

- JMAG可以通过计算多个转速情况下的磁场，计算NVH瀑布图
- 呼吸模态比4阶模态频率低，故呼吸模态为主要贡献模态



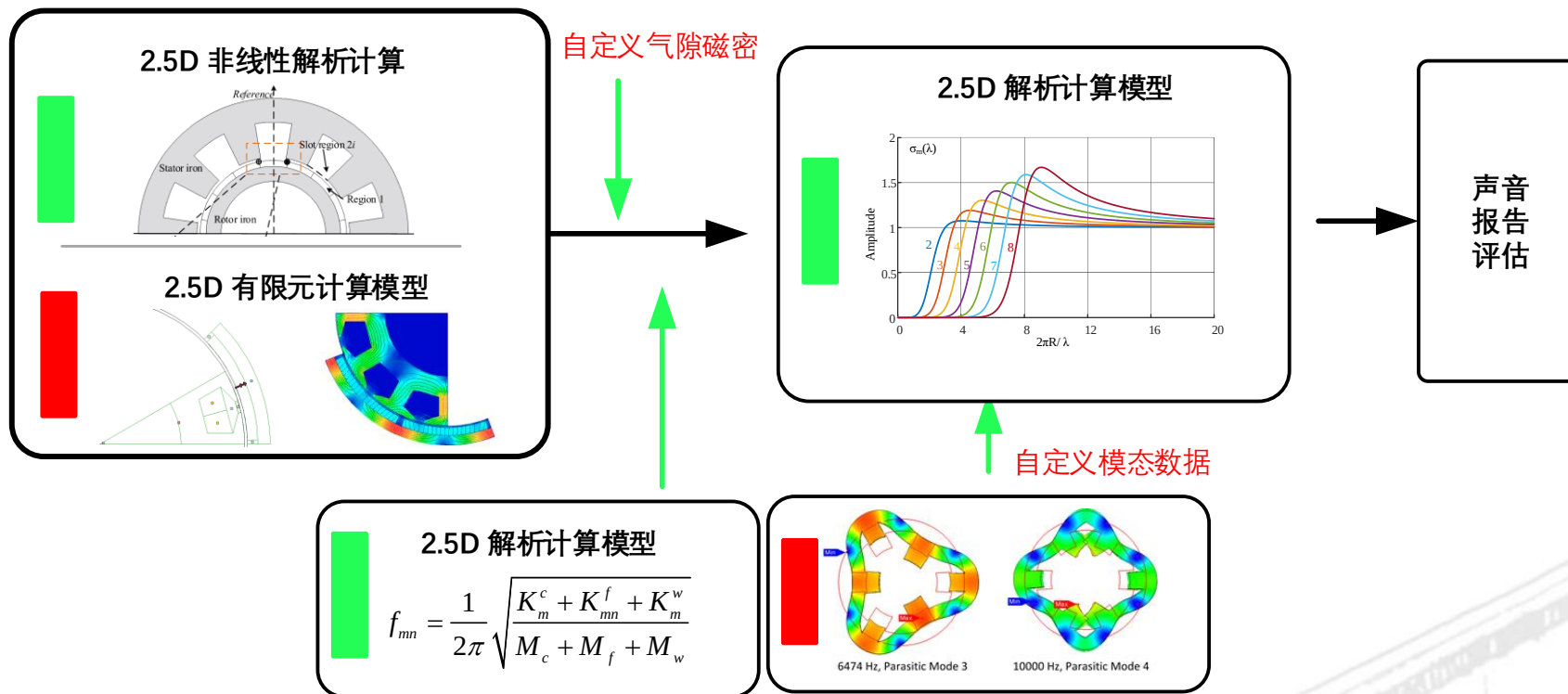
JMAG仿真结果



E. 课题组相关研究工作



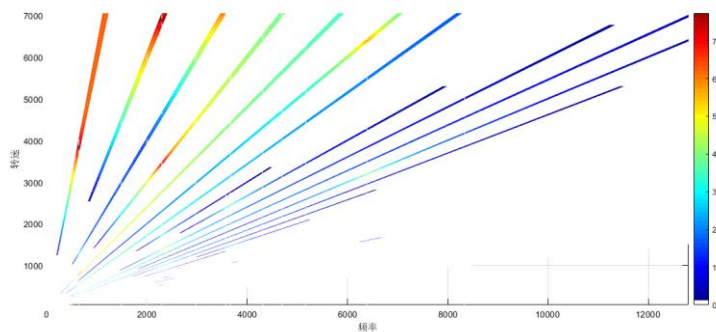
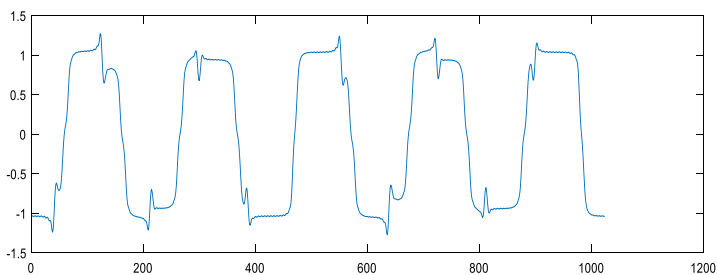
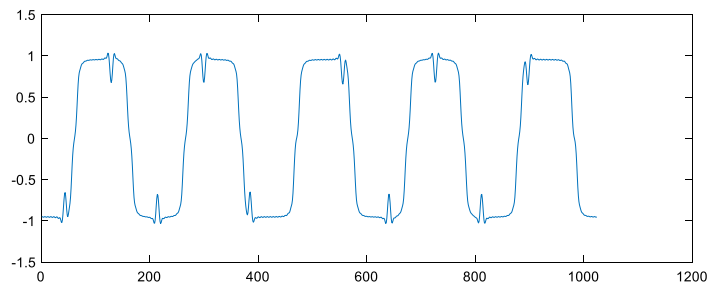
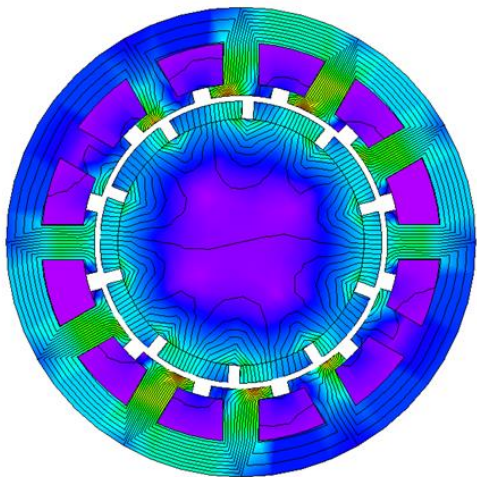
- 基于解析的振动噪声计算：



- 基于解析法的振动噪声计算，速度快；
- 适合初始设计中的噪声校核。

表贴式永磁电机振动噪声

- 10/12表贴式永磁电机

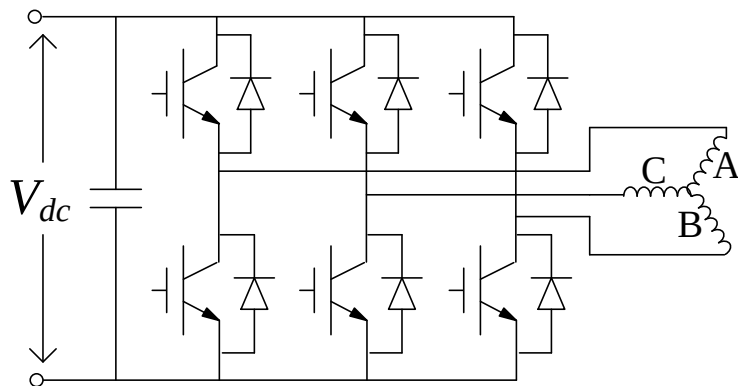


- 空载与负载磁场可以较快的计算得出。
- 空间与时间节点可以很好的把控



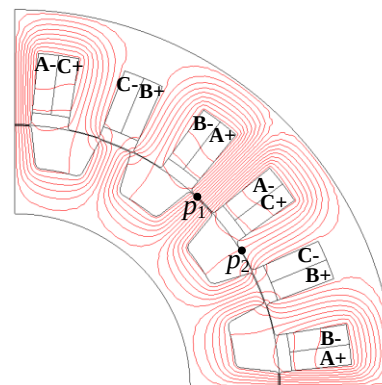
开关磁阻电机振动噪声

- Mutually-Coupled SRM



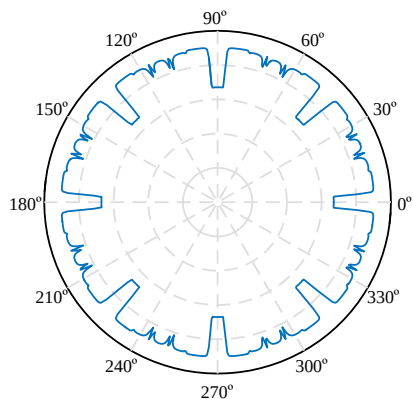
控制电路

Look up table

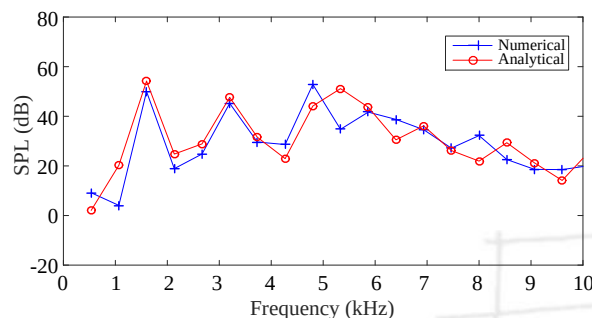


电机仿真

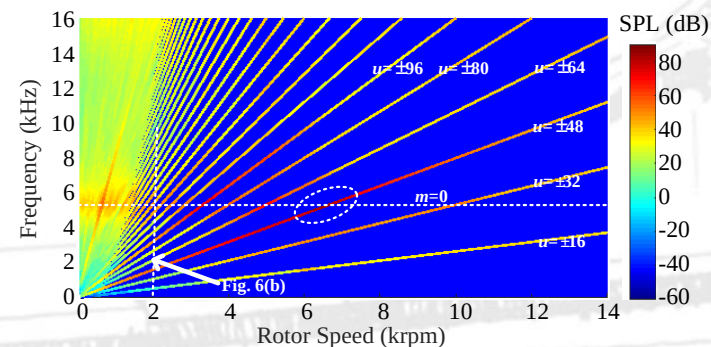
2000 rpm计算噪音



空间力分布



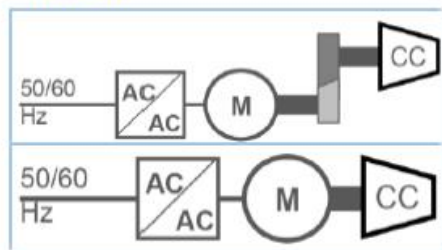
2000 rpm噪音



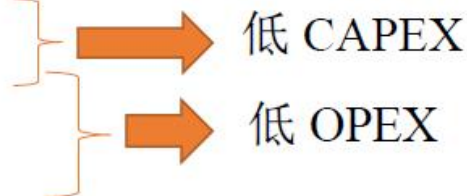
0-14krpm噪声瀑布图



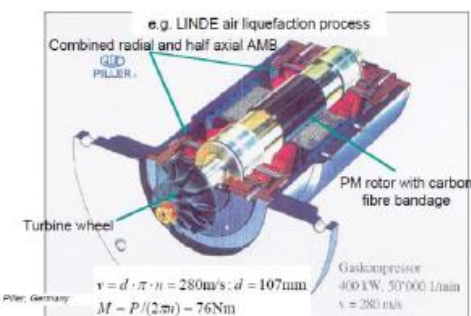
优势



- 体积小, 功率密度高
- 无齿轮, 故障率低
- 节能, 效率高
- 噪声、泄露低

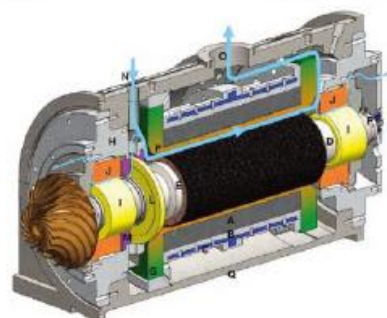


应用



天然气应用:

- 天然气压缩
- 余压发电
- LNG



工业应用:

- 电主轴
- 空气压缩机和鼓风机
- 飞轮储能

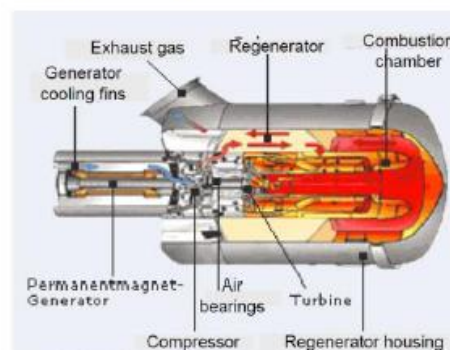
640kW, 10kr/min, 鼓风机(Nidec-asi)



1.4kW, 90 kr/min干手机(Dyson)

生活应用:

- 干手机
- 吸尘器
- 按摩仪



其它应用:

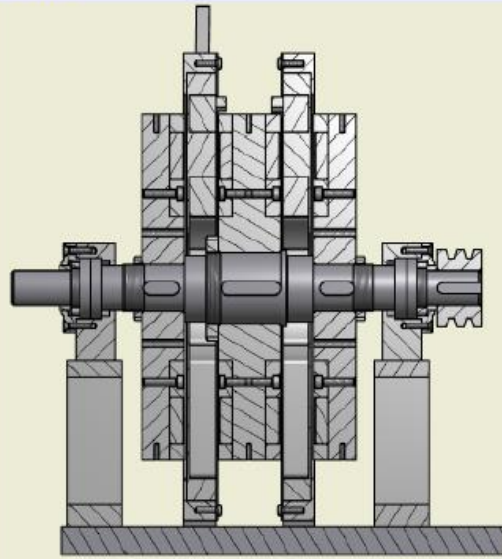
- 航空发电机
- 直接能量武器
- 微燃气轮机

ABB

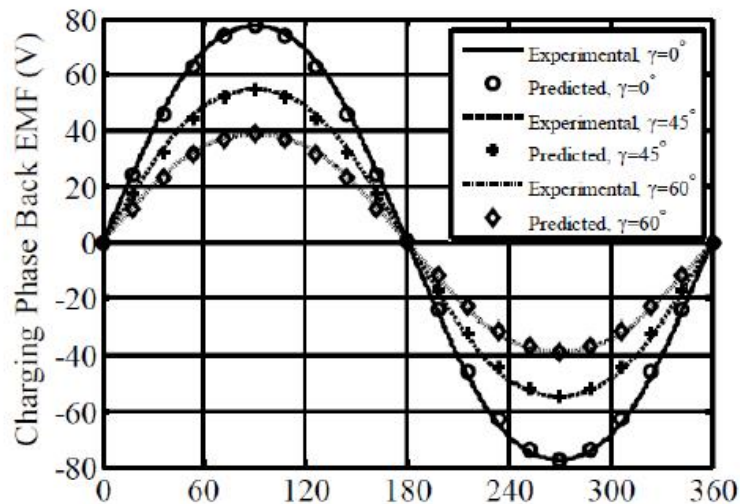
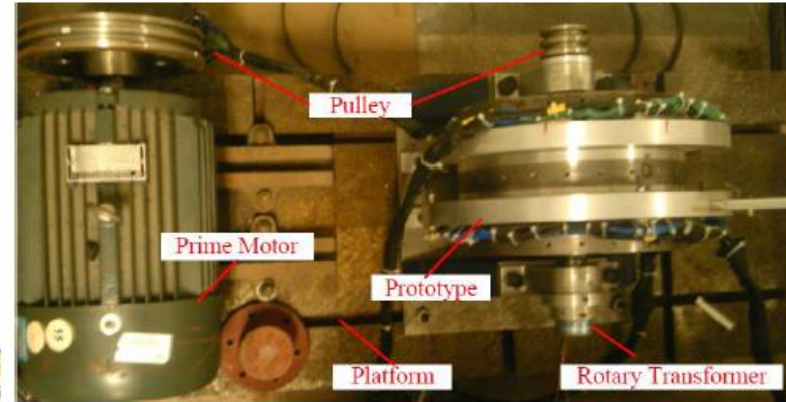


课题组工作-无铁心轴向磁通永磁电机

CAD



Components and tools

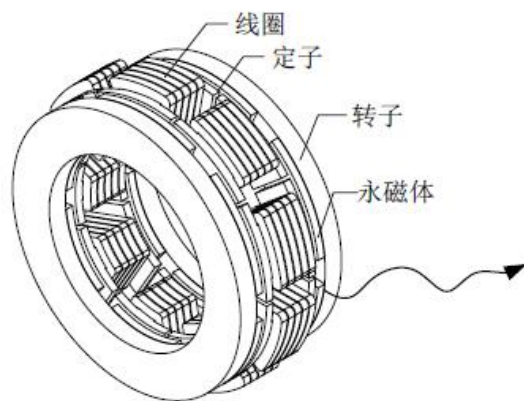
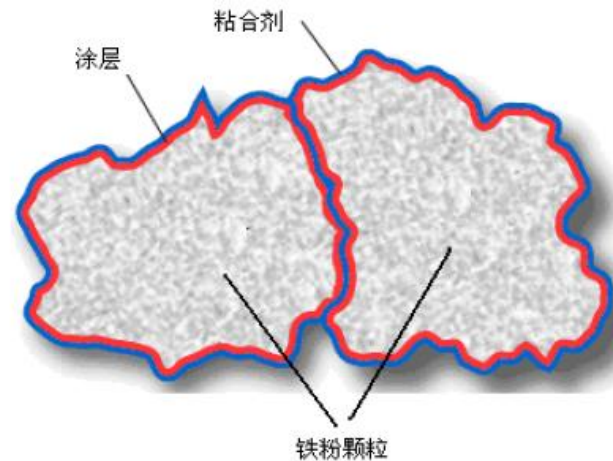


Parameters	Analytical	3D FEA	Measured
Peak Flux Density	0.389 T	0.387 T	0.390 T
Charging phase resistance	0.132 Ω	-	0.136 Ω
Discharging phase resistance	0.070 Ω	-	0.066 Ω
Charging phase inductance	32.0 μH	34.3 μH	39.3 μH
Discharging phase inductance	61.2 μH	59.0 μH	57.2 μH

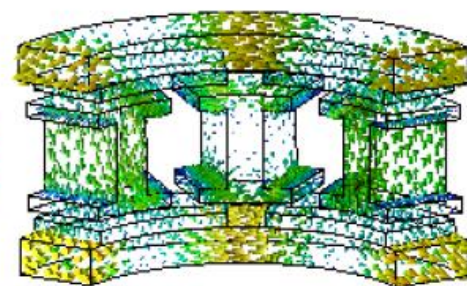
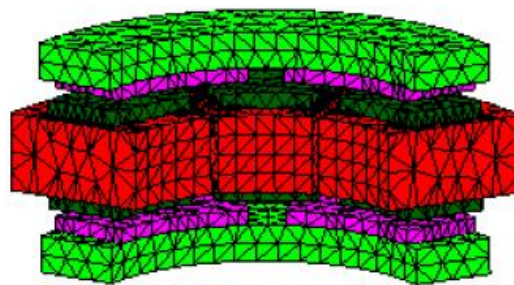
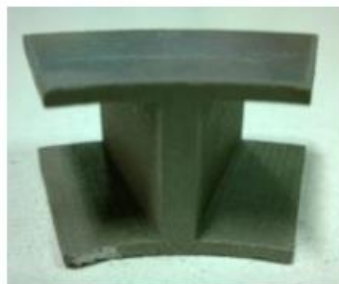


课题组工作-SMC轴向磁通永磁电机

软磁复合（Soft Magnetic Composite, SMC）材料是一种新型的软磁材料，它采用粉末冶金技术制造，由表面绝缘的金属粉末颗粒（主要为铁粉）所组成。

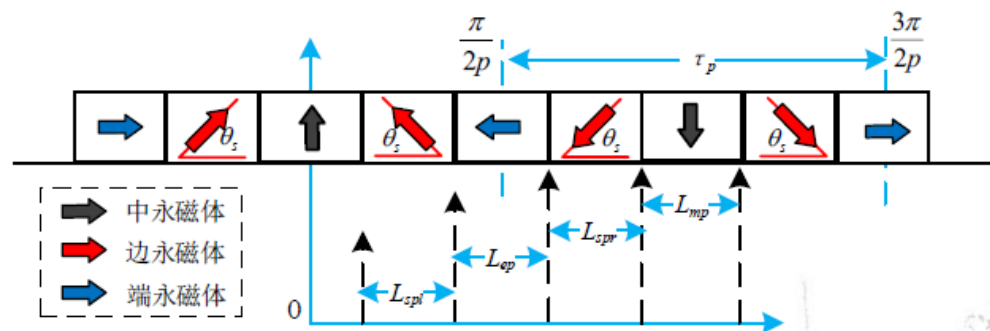
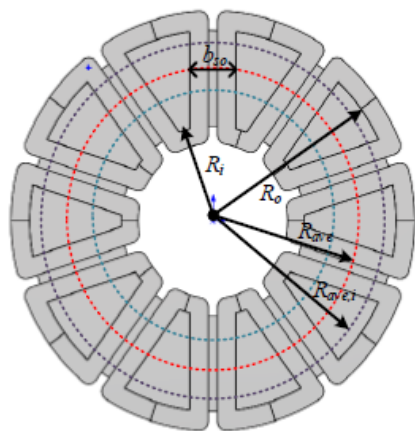
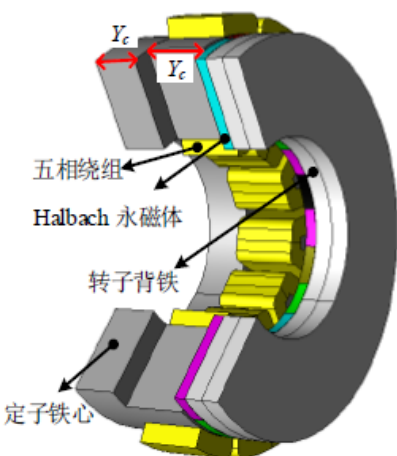
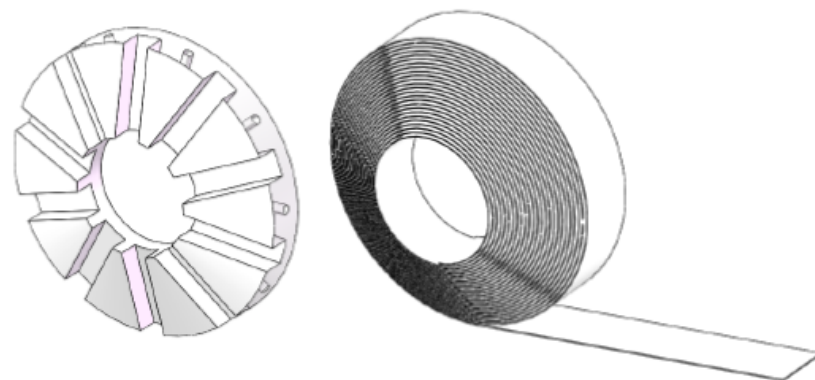


定子模块



课题组工作-AMM轴向磁通永磁电机

	硅钢片 (50W350)	SMC (Somaloy 500+0.5%)	AMM (2605SA1)
磁密, T@5000 A/m	1.66 (50Hz)	1.45 (500Hz)	1.57 (60Hz)
叠压系数, %	90-95	实心	60-90
相对磁导率	5,000	500	600,000
电阻, $\mu\Omega\text{cm}$	49	10,000	130
损耗, @50Hz 1T	1.45	7	0.125
磁路	2D	3D	2D



Loss Model: Combine with MEC

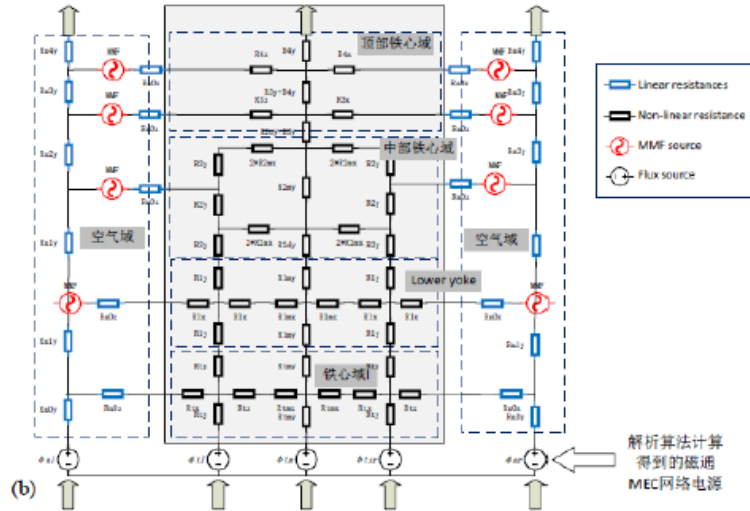


表 3-9 三维有限元与磁网络算法铁心损耗对比

位置 \ 模型	空载			负载		
	3DFEM	MEC	误差	3D FEM	MEC	误差
定子铁心齿部	212.49 W	209.94 W	-1.2%	459.57 W	470.14 W	2.3%
定子铁心轭部	214.14 W	223.56 W	4.4%	496.94 W	512.84 W	3.2%

Can get accurate loss distribution and temperature rise.

Thermal Model: LPTN combine CFD

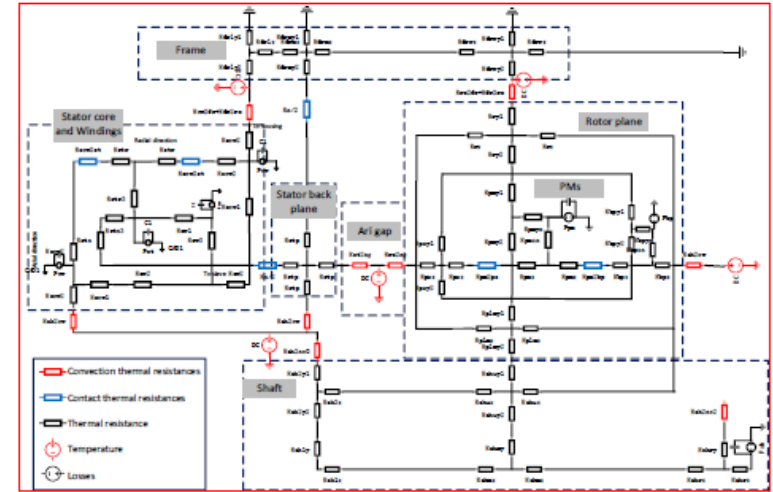
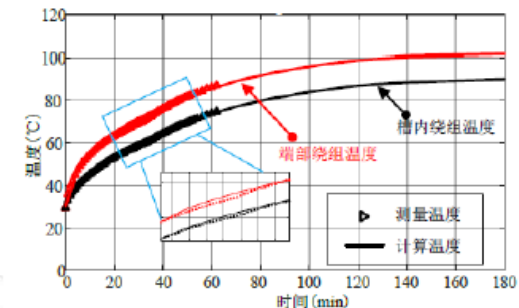


表 4-4 LPTN 与 CFD 温升计算结果对比 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

	空载		负载	
	CFD	LPTN	CFD	LPTN
定子铁心	34.9	38.1	106.5	110.0
定子绕组	33.5	36.3	103.8	105.1
转子永磁体	11.6	13.5	30.1	33.6



**Thank you
for your attention.**

郭保成 博士

东南大学 电气工程学院

guobaocheng1986@gmail.com

黄允凯 教授 博导

东南大学 电气工程学院

huangyk@seu.edu.cn

电话/微信: 13815881694

彭飞 博士 讲师

东南大学 电气工程学院

pengfei@seu.edu.cn

