

**声明：**© 2019, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL 公司所有。  
课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

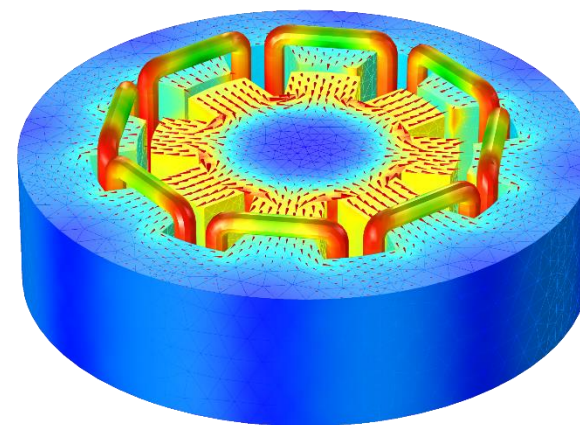
# COMSOL Multiphysics® 低频电磁场建模

## Part IV

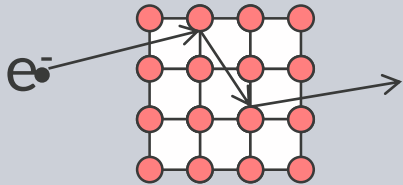
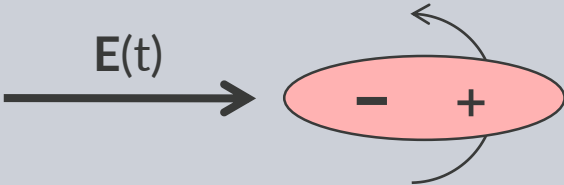
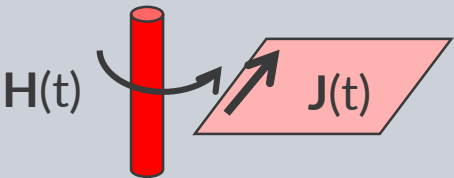
张 凯  
应用工程师  
COMSOL 中国

# 日程

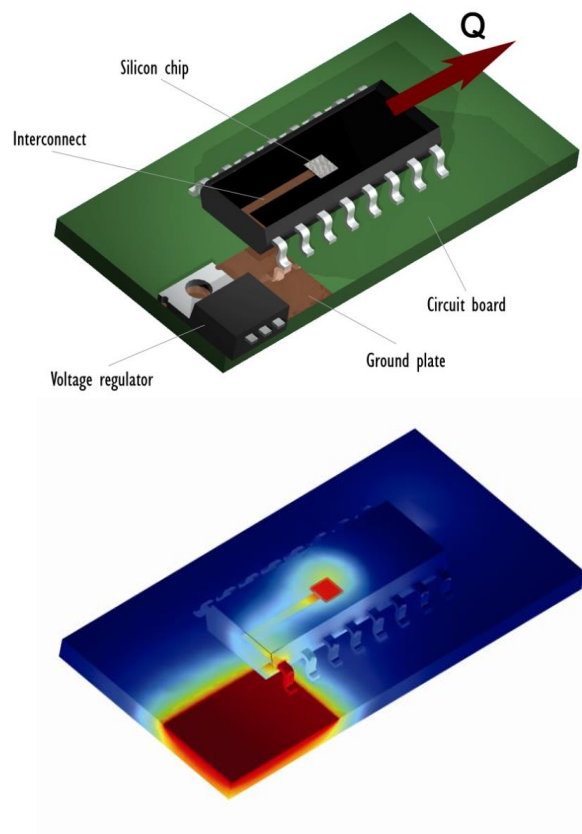
- AC/DC模块简介
- 麦克斯韦方程理论
- 静电
- 电流、永磁体建模
- 磁场和线圈建模
- 电磁与发热、机械耦合建模
- 建模技巧讲解



# 电磁加热

<b>传导电流损耗</b>	
电子通过导体运动损耗能量	
<b>位移电流损耗</b>	
偶极分子在时变电场中旋转	
<b>感应电流损耗</b>	
时变磁场在导体中感应电流	
所有上述损耗都包含在广义传热方程中	$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{\text{电磁损耗}}$

# 电 - 热耦合



$$\sigma = \frac{1}{\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))}$$

EM 分析:  $\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0$

焦耳热

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = Q$$

mit  $Q = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$

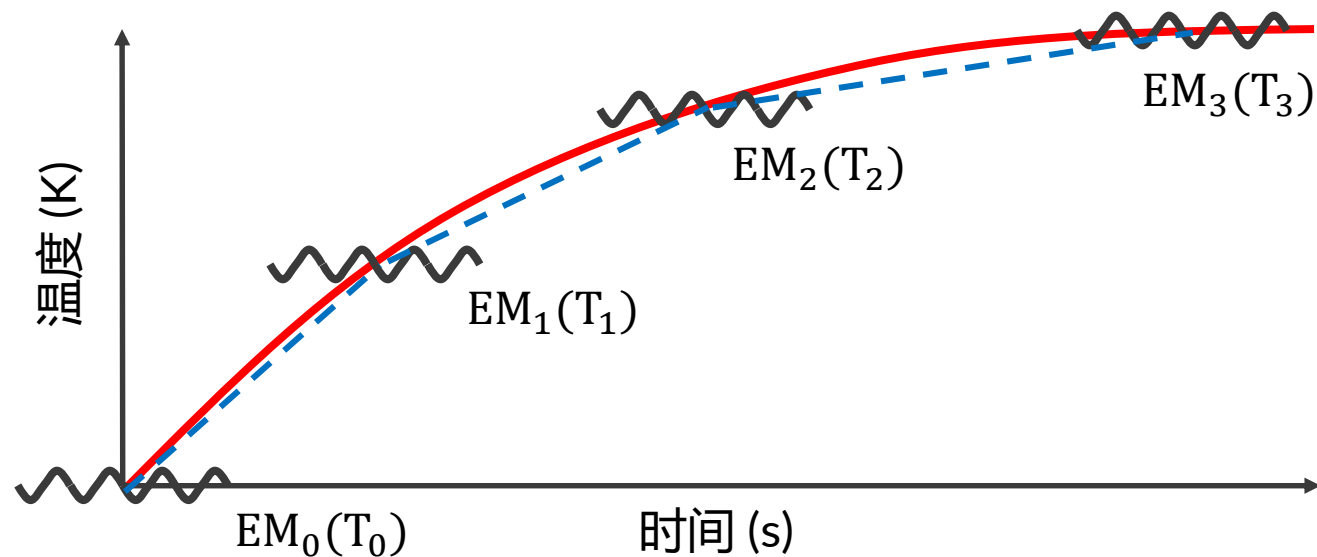
温度分布

# 求解频域-瞬态

- 1) 电磁场振荡  $f \sim 1 \text{ GHz}$   $T \sim 1 \text{ ns}$   $\longleftrightarrow$
- 2) 传热过程时间尺度量级  $\sim 1 \text{ s}$

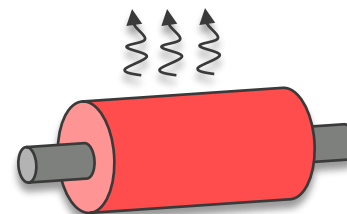
## 求解

以瞬态求解传热方程，以频域求解电磁波，当温度对材料属性产生影响时更新解



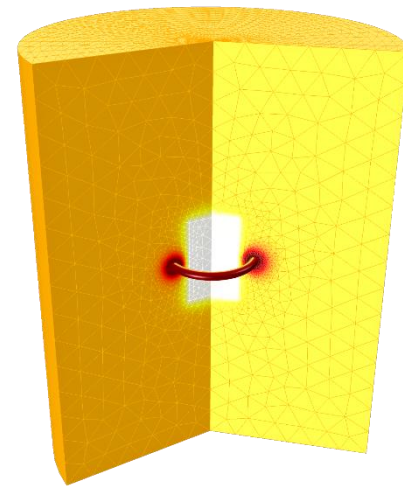
# 多物理场

- 在温度下拉菜单中选择
- 材料为热敏性，如  $\sigma(T)$ ，线性化电阻率等
- 电磁损耗热源
- 等等



# DEMO:感应加热

- 线圈围绕铜柱的二维轴对称模型
- 感应加热接口以双向耦合的方式求解频域电磁场和时域传热问题
- 当温度上升时，电导率发生变化
- 计算了一段时间内温度的上升
- 拓展：自然对流、强制对流

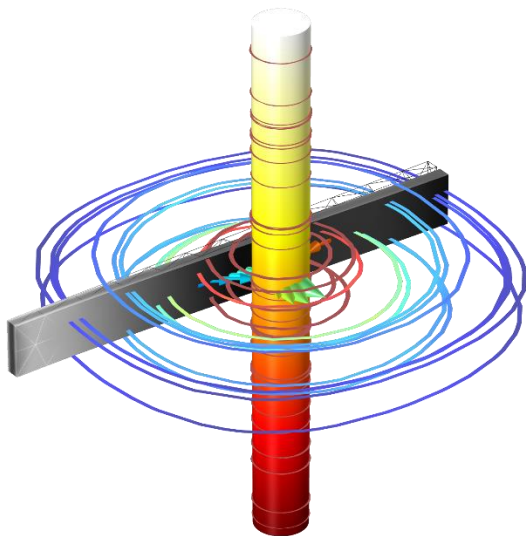


<http://cn.comsol.com/showroom/gallery/148/>

<http://cn.comsol.com/model/free-convection-in-a-light-bulb-303>

# 练习：磁阻尼

- 在静磁场中振动的导电实体的结构阻尼
- 悬臂梁在一个频率范围内时谐激励并处于强磁场中时，对磁场的影响
- 假设结构位移的相对量级很小，材料为各向同性和线性属性，且磁场为静态



<https://www.comsol.com/model/magnetic-damping-of-vibrating-conducting-solids-12437>



# 旋转机械，磁 (rmm)

- 旋转机械，磁接口包含三个物理接口：
  - 磁场：基于磁矢势 (MVP)
  - 磁场，无电流：基于磁标势(MSP)
  - 移动网格：指定转子位置和速度
- 支持稳态和时域求解

磁场，无电流

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= 0 \\ \mathbf{H} &= -\nabla V_m \\ \mathbf{B} &= \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \\ -\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}) &= 0\end{aligned}$$

其中， $V_m$  为磁标势

磁场

稳态

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_e \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{H} &= \mu^{-1} \mathbf{B}\end{aligned}$$

其中， $\mathbf{A}$  是磁矢量势， $\mathbf{J}_e$  是电流密度，  
它们能同时求解，或单独分析

瞬态

$$\begin{aligned}\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_e \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{H} &= \mu^{-1} \mathbf{B}\end{aligned}$$

控制方程中不包括位移电流

# 旋转机械建模步骤

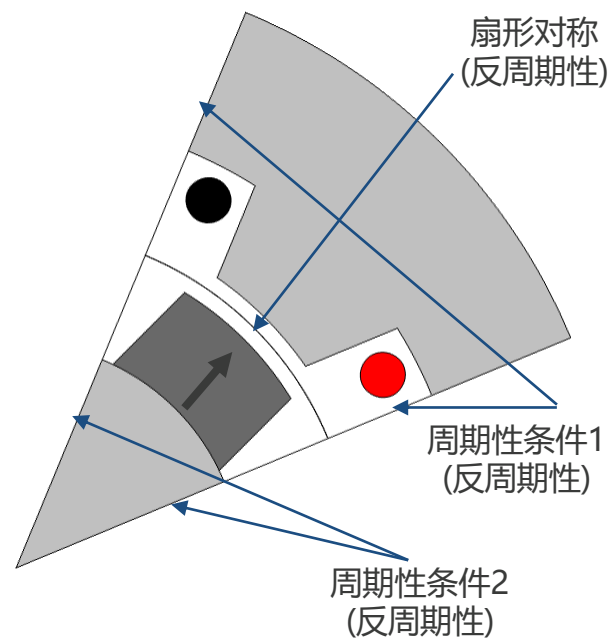
- 空间维度选择
  - 二维、三维
- 导入/创建设备几何
  - 形成装配体
  - 充分利用对称性
- 指定材料属性
  - 线性；非线性：BH 曲线，
  - 各向异性：叠层，微观结构...
- 物理场设置
  - 标量势或矢量势
  - 电流或电压驱动
  - 永磁体？
  - 旋转(角度、速度或ODE)
  - 与电路连接
- 创建网格
  - 自动网格剖分工具
  - 通常对扇形模型自定义剖分
- 选择分析类型
  - 线圈几何分析
  - 稳态
  - 瞬态
- 求解！
- 后处理
  - 扭矩；感应电势；损耗（铜、磁滞、铁芯等）；转速等

# 旋转机械建模技巧

- 旋转机械，磁接口包含三个物理接口：
  - 磁场， MVP
  - 磁场，无电流， MSP
  - 移动网格，
- 几何：装配体
  - 两个对象 (定子和转子)
  - 两个“单元”之间形成装配体特征
  - 检查一致对的源和目标
  - 定子/源，转子/目标
- 网格：
  - 一致对上目标边界比源边界更细化的网格
  - 在扇形域对称/滑动边界处网格要更细
  - 在周期性边界上采用复制网格
- 指定旋转： 指定旋转角
- 指定旋转速度： 指定常数角速度

# 旋转机械建模技巧

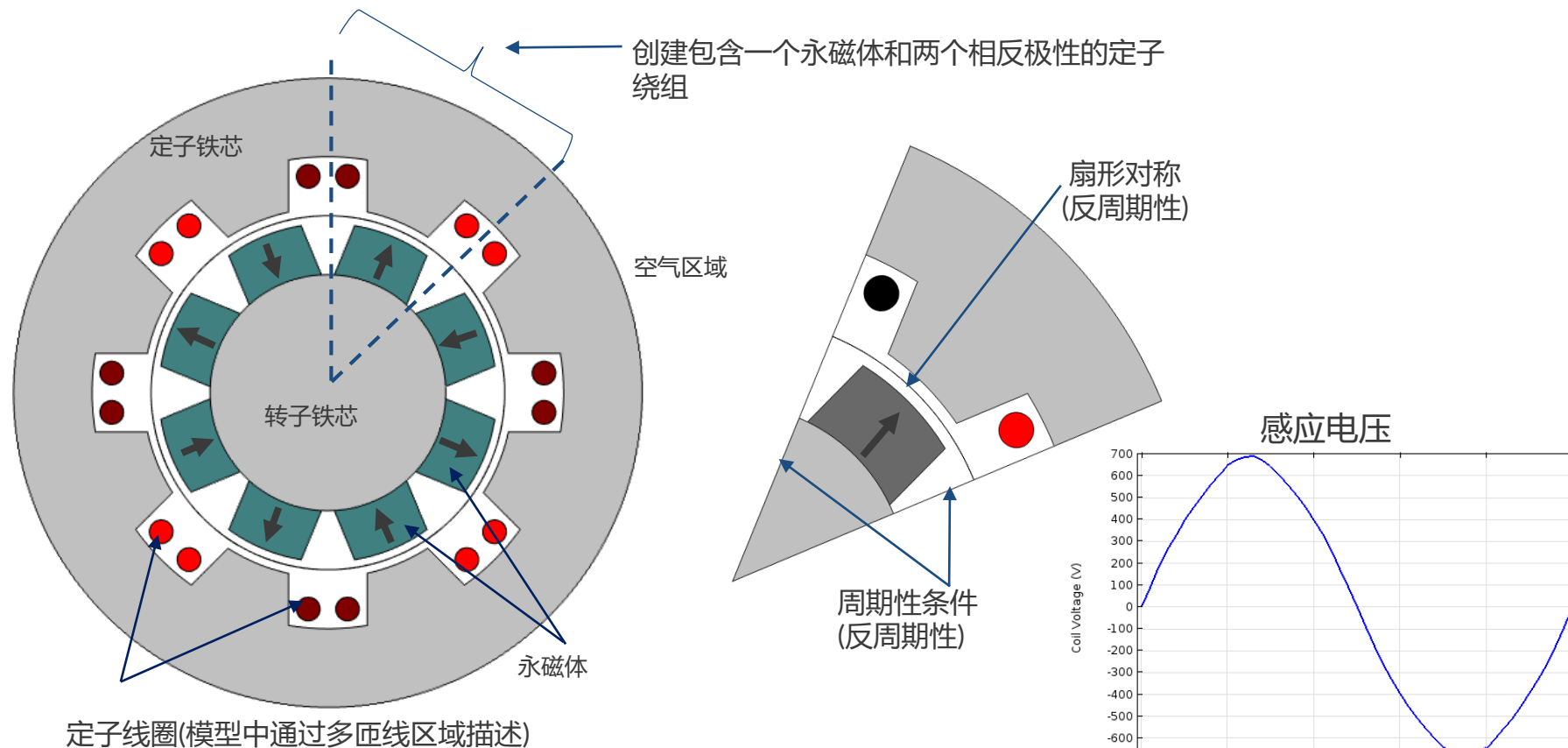
- 周期性边界条件：
  - 分别指定定子和转子的周期性边界
- 在磁标势区域没有回路电流
  - 在三维‘磁场’区域使用线圈
- 一致对条件只施加在‘磁场，无电流’区域
- 求解步骤：通过稳态求解得到瞬态求解的初始值（当模型中存在永磁体时）



# 旋转机械建模技巧

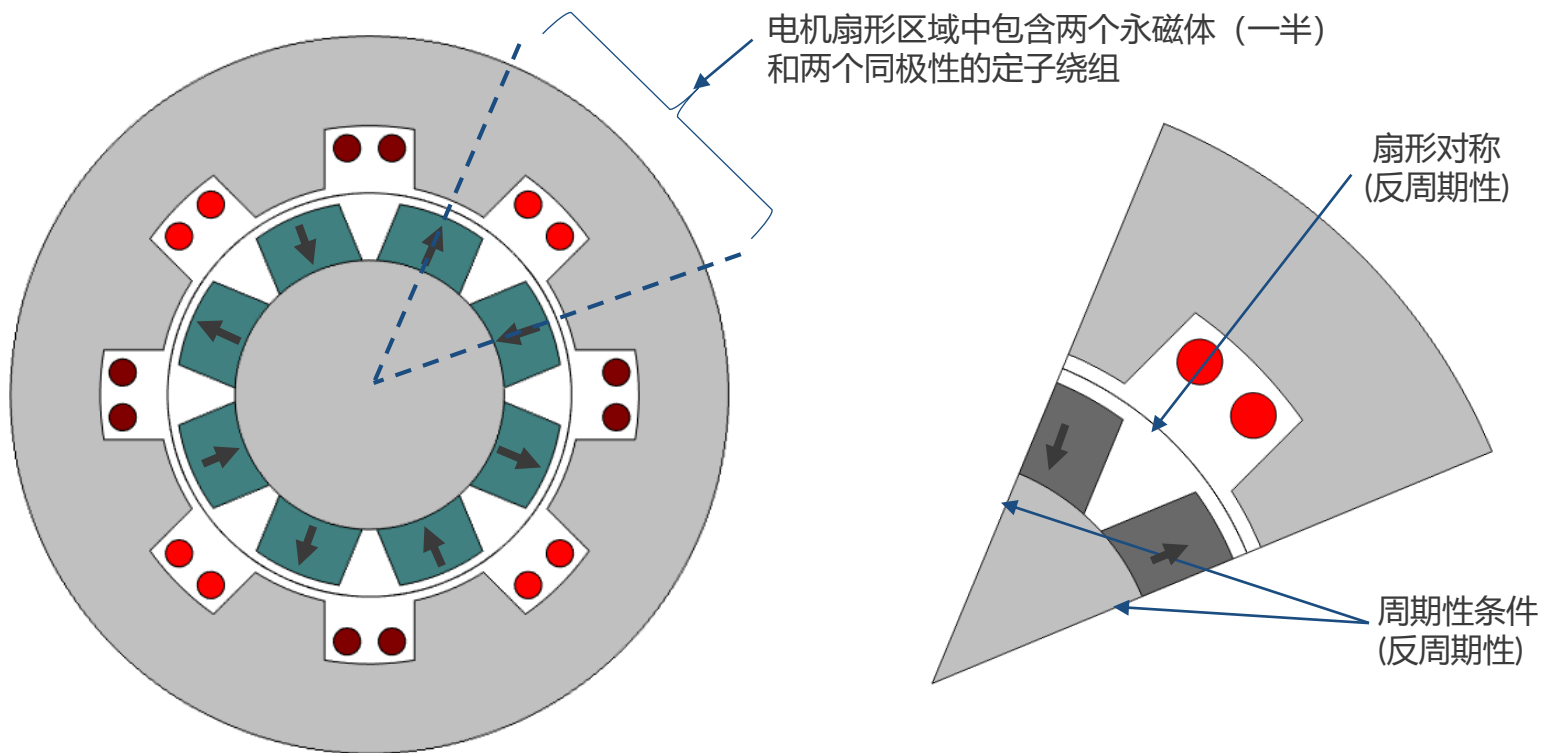
- 全耦合、直接求解器：
  - 当耦合外部电路接口时
- 添加磁标势度规修复，便于A收敛
- MSP接口中添加点约束
- 建模步骤：
  - 从二维扇形模型开始
  - 三维模型，使用线性网格单元和线性材料
  - 非线性材料，使用线性网格单元和更细化的网格
- 求解步骤：通过稳态求解得到瞬态求解的初始值（当模型中存在永磁体时）

# 二维发电机模型



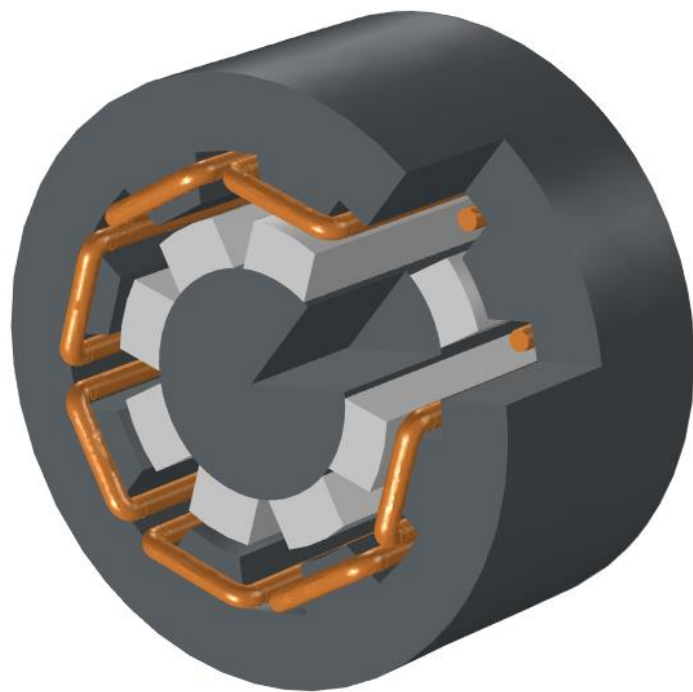
注意：定子绕组包含100匝截面直径3mm的线圈。即，在上图黑色和红色圆环内包含100股直径3mm的导线，电机长度0.4m  
定子线圈上的感应电压：电压 = rmm.Vcoil\_1\*扇区数= rmm.Vcoil\_1\*8

# 二维发电机模型：方法2

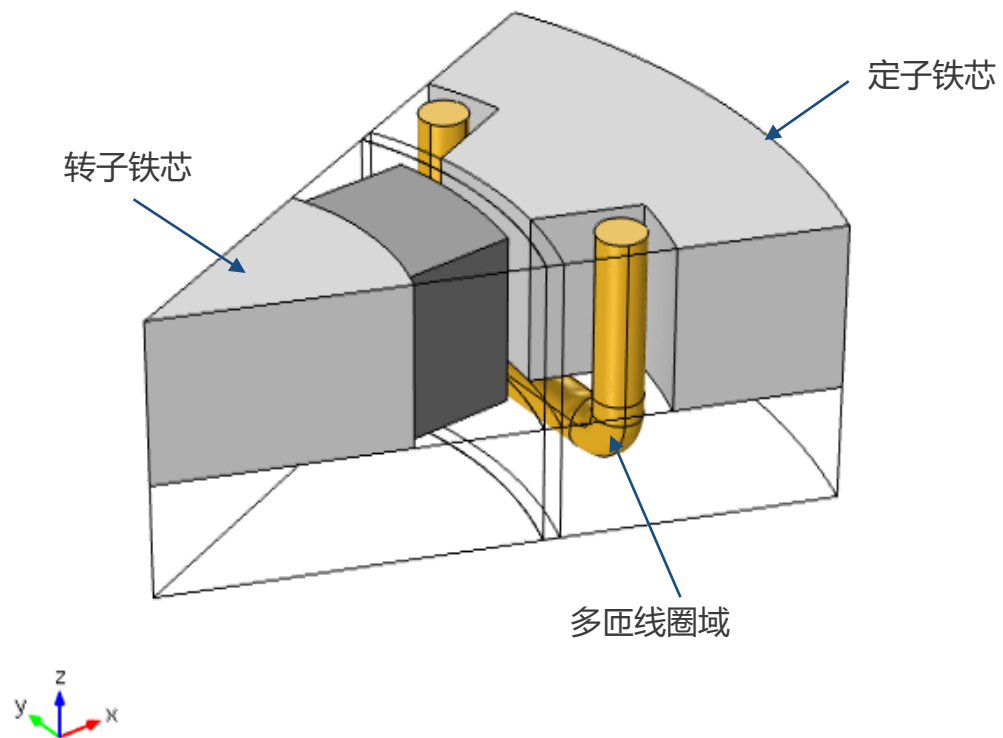


注意：定子线圈上的感应电压：  
电压 =  $\text{mm.Vcoil\_1} \times \text{扇区数} \times 2 = \text{mm.Vcoil\_1} \times 16$

# 三维发电机模型



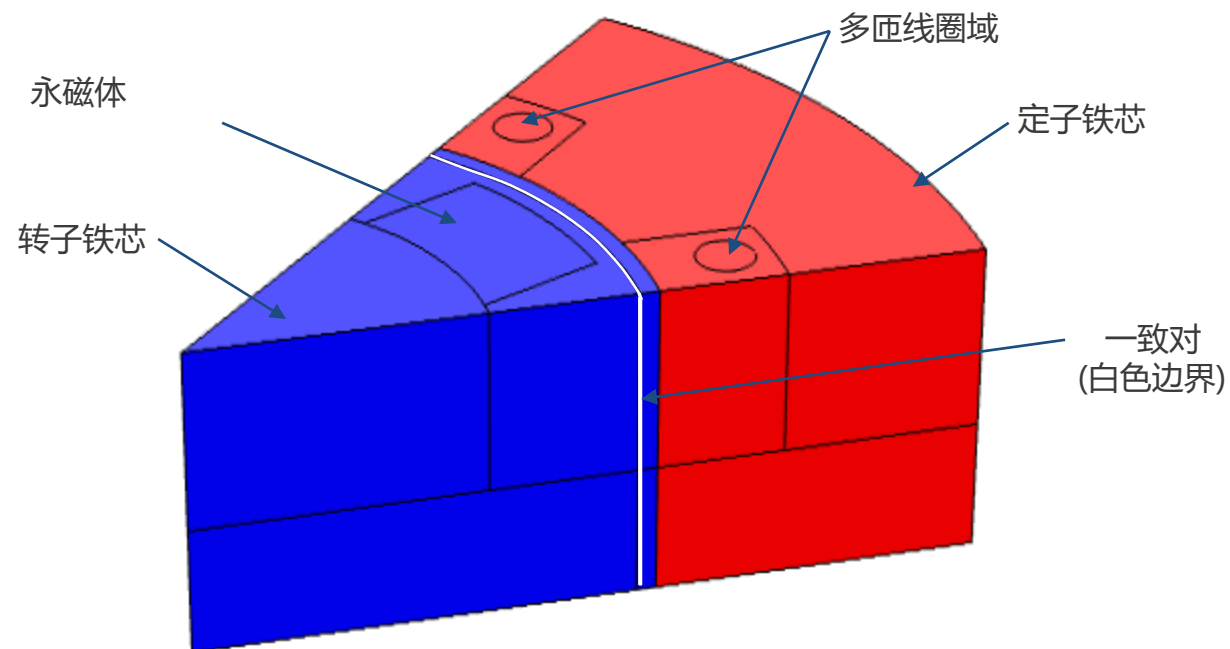
三维电机原理图，截面显示了转子、定子和定子绕组



相对于全三维模型计算时间减少16倍



# 三维发电机模型（续）



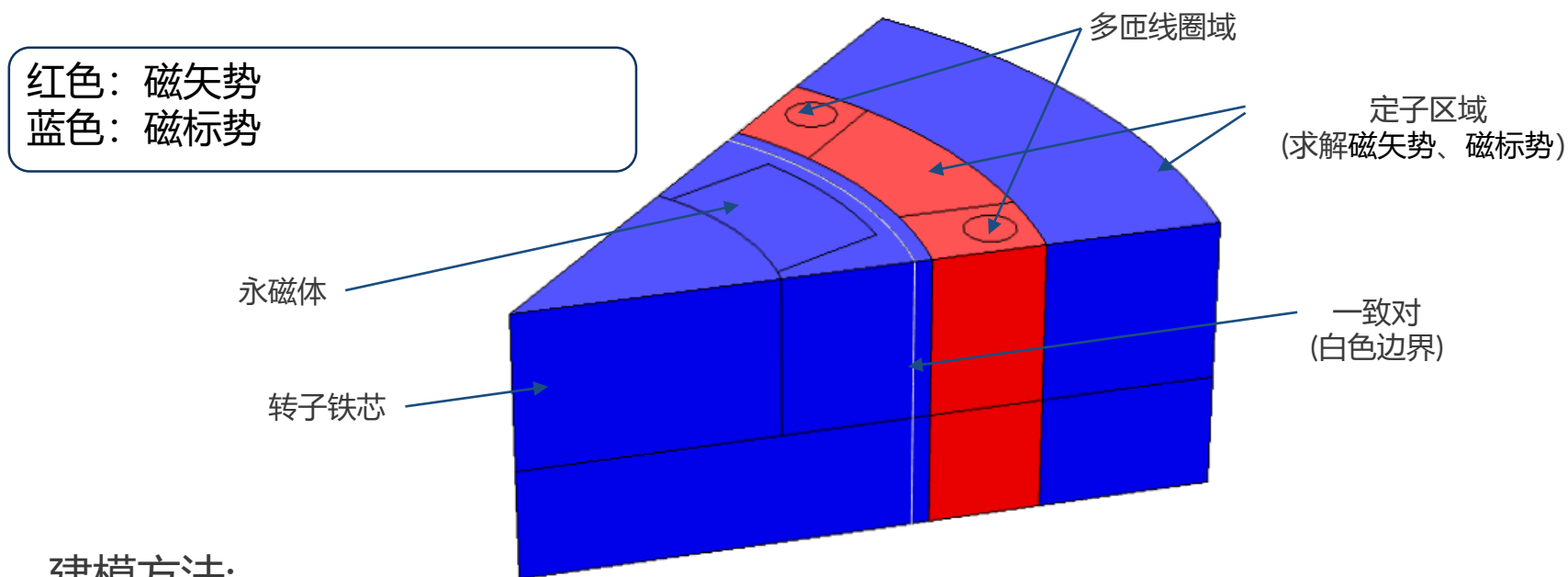
## 建模方法:

- 转子、定子和转子之间的空气间隙: 磁标势(蓝)
- 定子(铁芯和线圈): 磁矢势(红)

注意: 一致对一般只用于磁标势区域。

磁标势区域不包含任何环路电流, 如线圈

# 三维发电机模型：定子中的混合公式



## 建模方法:

转子、转子与定子之间的空气间隙：磁标势 (MSP)

定子铁芯：磁矢势(MVP) 和磁标势 (MSP)

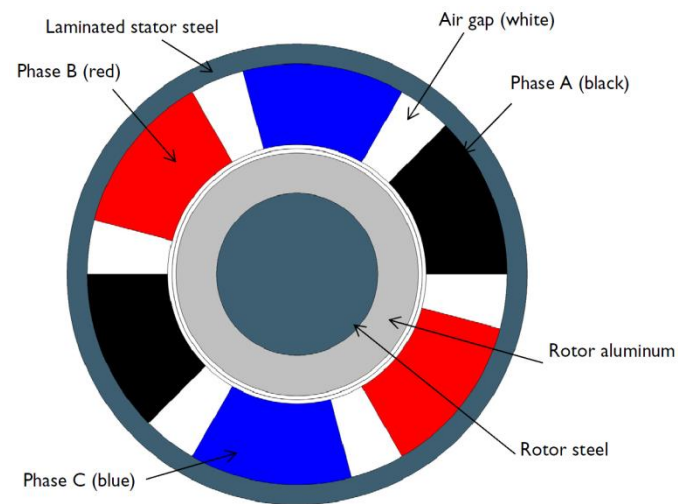
定子线圈：仅MVP

一致对：MSP区域 (上图白色边界)

注意：定子区域分为MVP和MSP。保证载流线圈仅包含在MVP区域。

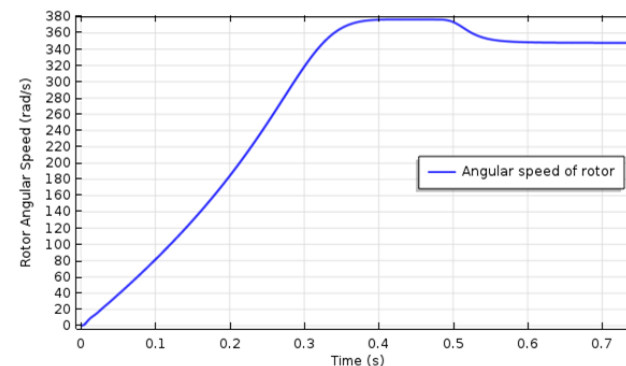
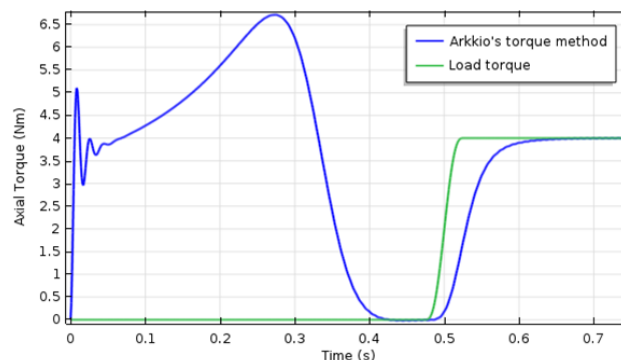
# 二维感应电动机

- 感应电动机模型包含圆柱形转子和三相定子绕组
- 转矩和角速度为时间的函数
- 感应的负载扭矩随时间阶跃变化
- 通过'全局ODE 和 DAEs '描述转子的动力学过程



$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_m - T_L}{J}$$

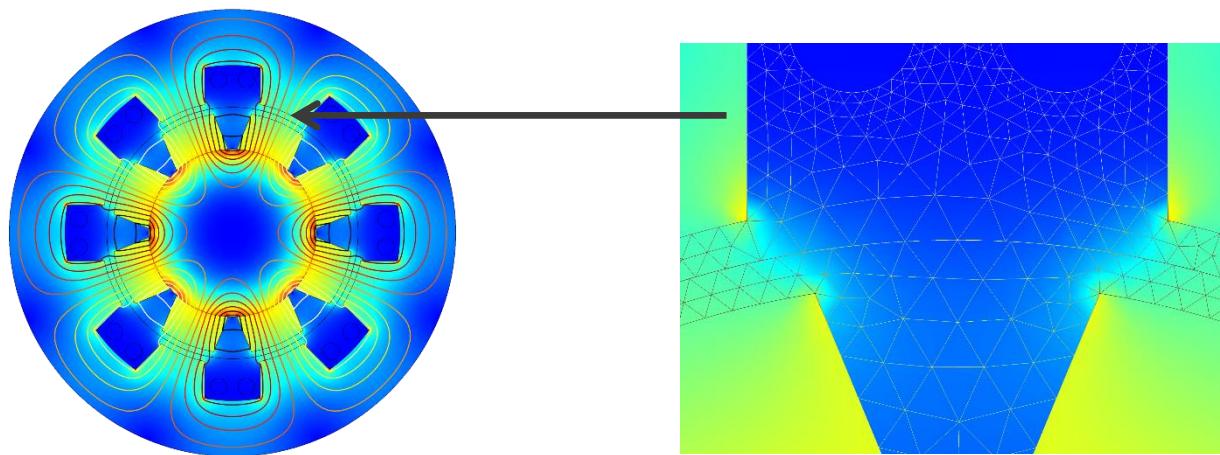
$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_m$$



<https://www.comsol.com/blogs/how-to-analyze-an-induction-motor-a-team-benchmark-model/>

# 仿真发电机的移动零件

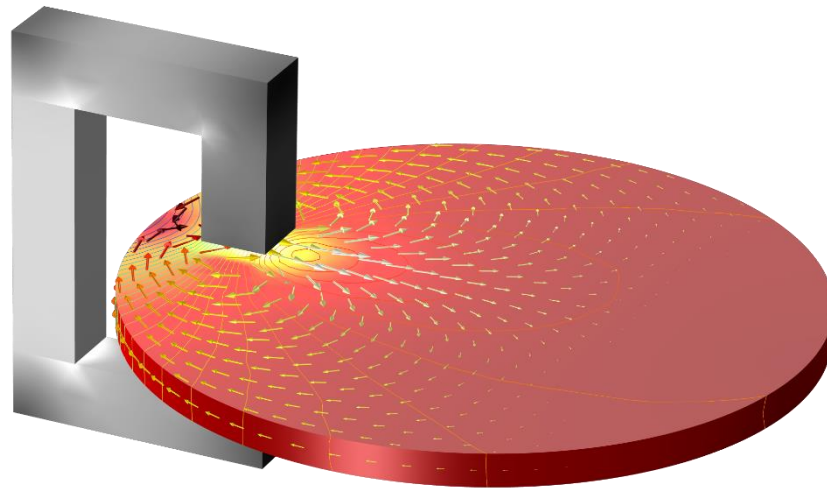
- “旋转机械，磁” 接口求解磁性材料组成的二维和三维旋转域
- 有限元网格允许在界面上滑动
- 模型中包括非线性磁性材料
- 计算了作为旋转速度函数的感应电压



<http://cn.comsol.com/showroom/gallery/2122/>

# 练习：磁刹车

- 磁刹车包含永磁体，在旋转铜盘中感应出电流
- 产生的涡流与磁通量相互作用产生 Lorentz 力，产生制动力矩
- 三维模型使用电磁场的静态公式与旋转刚体动力学的常微分方程耦合求解



<http://cn.comsol.com/showroom/gallery/2014/>

# 旋转机械学习案例及博客

<http://cn.comsol.com/blogs/how-to-model-rotating-machinery-in-3d>

<http://cn.comsol.com/blogs/guidelines-for-modeling-rotating-machines-in-3d>

<http://cn.comsol.com/blogs/how-to-analyze-an-induction-motor-a-team-benchmark-model>

<http://cn.comsol.com/blogs/modeling-magnetic-gears-in-comsol-multiphysics>

<http://cn.comsol.com/blogs/analyzing-the-structural-integrity-of-an-induction-motor-with-simulation>