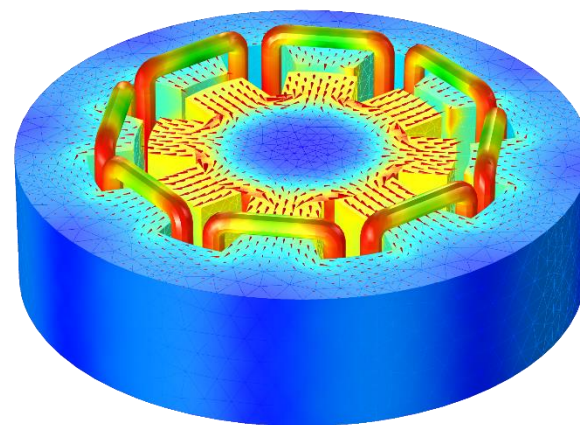


COMSOL Multiphysics® 低频电磁场 建模 Part 3

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
- 静电建模
- 电流和永磁体建模
- 磁场和线圈建模
- 电磁与热、机械耦合建模
- 建模技巧讲解



Maxwell's 方程组

高斯定律
高斯定理
(磁)

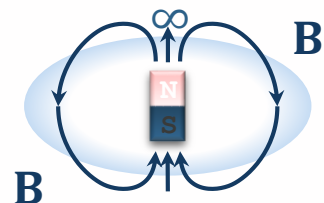
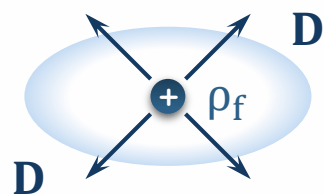
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{j}\omega \mathbf{B}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 + \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}\omega \mathbf{D}$$

法拉第定律
安培定律



上述微分方程采用国际单位制 (SI)

Maxwell's 方程组

| | | | |
|---------------|----------------------------------|--|---|
| 高斯定律 | $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ | $\nabla \times \mathbf{E} = 0 - \partial \mathbf{B} / \partial t - j\omega \mathbf{B}$ | 法拉第定律 |
| 高斯定律 (磁) | $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ | $\nabla \times \mathbf{H} = 0 + \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t + j\omega \mathbf{D}$ | 安培定律 |
| 电场 (标量、矢量势) | | $\mathbf{E} = -\nabla V - \partial \mathbf{A} / \partial t - j\omega \mathbf{A}$ | 隐含法拉第定律 |
| 磁场 (标量势) | | $\mathbf{H} = -\nabla V_m + \mathbf{H}_b$ | 隐含 $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ |
| 磁通密度 (矢量势) | | $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{A}_b$ | 隐含 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ |
| 本构关系, 介电 | | $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + \mathbf{D}_r$ | 或, $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E}$ |
| 本构关系, 磁 | | $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad \mathbf{B}(\mathbf{H}) \text{ curve}$ | 或, $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$ |
| 欧姆定律包含洛伦兹项 | | $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}_e$ | 波数 $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ |
| 欧姆定律 (反, 非线性) | | $\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} - \mathbf{J}_e) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ | 束包络 $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) e^{-j\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}}$ |
| 电流守恒 | | $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 + Q_j - \partial \rho / \partial t - j\omega \rho$ | 隐含 $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = 0$ |

电流密度: $\mathbf{J} = -\sigma \nabla V + j\omega \mathbf{D} - j\omega \sigma \mathbf{A} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$

欧姆
电流 位移
电流 感应
电流 感应
电流 外部
 电流

上述微分方程采用国际单位制 (SI)

电与磁之间的耦合关系

- 稳态研究中没有‘电磁耦合’（场不随时间变化）！
- 频域或瞬态时存在‘电磁耦合’

电：

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla V - j\omega\sigma\mathbf{A} + j\omega\mathbf{D} + \mathbf{J}_e$$

磁：

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$$

磁场(mf)接口

- 应用：

- 电流源产生的磁场；不计算电势；线圈条件下可添加电压、电流、电路激励；可与电流(ec)接口耦合；趋肤效应、电感效应

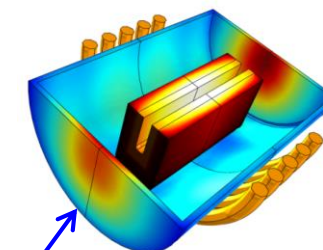
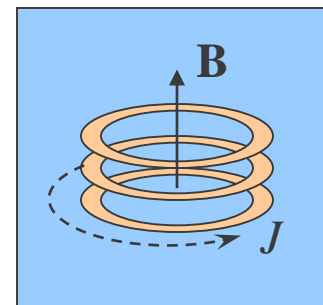
- 求解变量：磁矢量势 A

- 材料属性：电导率 σ ，相对介电常数 ϵ_r ，相对磁导率 μ_r 和 PM / BH

- 用于求解：

- 磁通密度： $B = \text{rot}(A)$ 和磁场强度： $H = B / (\mu_0 * \mu_r)$
- 感应电场 $E_i = - \delta A / \delta t$
- 电流密度 $J = \sigma * E$ ， $J_i = \sigma * E_i$ ，热源 $Q = J_i * E_i$
- 磁力（麦克斯韦应力张量，洛伦兹力）

- 求解类型：稳态 (st) + 频域 (freq) + 瞬态 (tr)

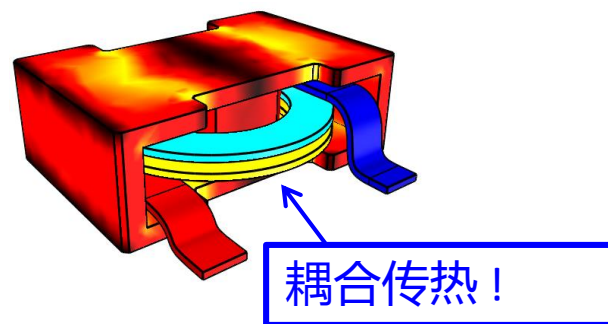
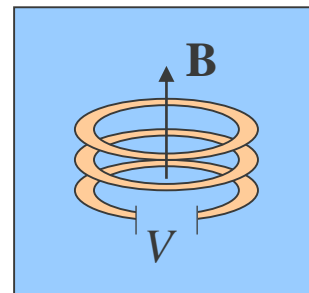


耦合传热!

- ▲ 预置研究
 - 线圈几何分析
 - 频域
 - 小信号分析，频域
 - 稳态
 - 瞬态


磁场和电场(mef)接口

- 应用：电流守恒情况下电流或电压源产生的电场和磁场
 - 线圈，电磁元件，考虑趋肤效应和电感效应
- 求解变量：磁矢势 A 和电势 V ($\rightarrow A$ - V 形式)
- 材料属性：电导率， σ 和相对介电常数， ϵ_r 和相对磁导率 μ_r + PM / BH
- 要计算多种电磁尺度：
 - 最复杂的接口（需调试）
- 求解类型：稳态 (st) + 频域 (freq)



- ▲ 预置研究
 - 线圈几何分析
 - 频域
 - 稳态

接口：磁场和电场

| 接口 | 稳态 | 瞬态 | 频域 |
|--------------------|--|--|--|
| 磁场 (mf) | $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$ | $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$ $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ | $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$ $\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A}$ |
| 磁场和 电场 (mef) | $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{E} = -\nabla V$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$ |  | $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A}$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$ |

磁场-域和边界条件

(mf) 域条件

(mf) 边界条件



- ☐ 安培定律
- ☐ 计算力
- ☐ 单匝线圈
- ☐ 多匝线圈
- ☐ 外电流密度
- ☐ 磁标势场度规修复
- ☐ 初始值

- ☐ 磁绝缘
- ☐ 磁场
- ☐ 表面电流
- ☐ 集总端口
- ☐ 集总单元
- ☐ 完美磁导体
- ☐ 薄低磁导率间隙
- ☐ 周期性条件
- ☐ 单匝线圈
- ☐ 多匝线圈
- ☐ 过渡边界条件
- ☐ 磁势
- ☐ 阻抗边界条件
- ☐ 磁屏蔽

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_0$$

$$-\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s$$

和电路耦合(cir)

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0$$

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e$$

边界条件

- 常用边界条件：

- 磁绝缘 (磁场线与边界平行)
- 完美磁导体 (磁场线与边界垂直)

- 其他边界条件：

- 低薄磁导率间隙 (低磁导率边界)
- 磁屏蔽 (高磁导率边界)
- 集总端口 (电场与两个导体连接)
- 阻抗边界条件 (外部阻抗边界)

- 磁场接口的主要难点在于指定某一区域的外部电流密度。可以通过一些特定的域条件来实现

电磁势-度规

- 实际能够检测的场变量是 \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{H} 及 \mathbf{J} 而不是势场。
- 同样的场强可能对应不同的势场——度规自由：
- 举例：电场

$$\mathbf{E} = -\nabla V = -\nabla(V + C) \quad C = \text{常数}$$

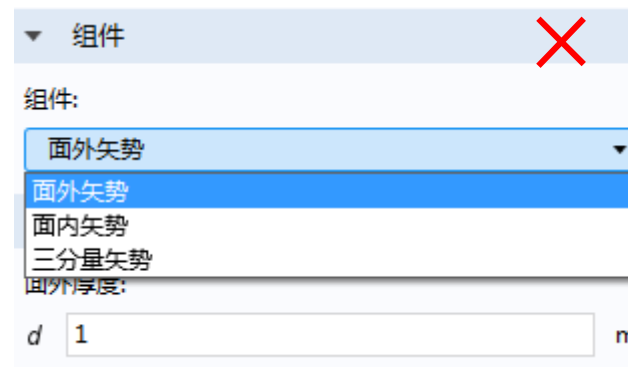
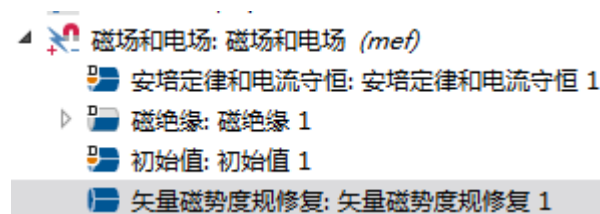
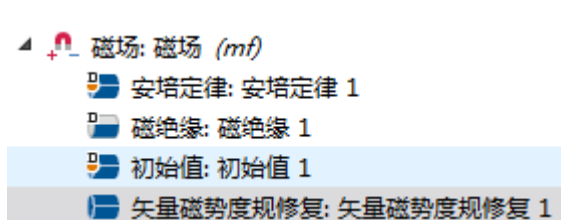
下面情况也会得到相同的场强：

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \nabla \psi \quad V \rightarrow V - \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

度规修复 (“规范固定”)

- (mf) 和 (mef)下的磁标势场度规修复:
- 为使 A 场唯一并增强数值稳定性, 有时需要给域上施加额外条件约束 A
- 不适用于 2D 下平面外矢量 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$



度规修复 (“规范固定”)

- 应用 – 度规修复：
 - 求解额外的标量变量 ψ
 - 额外的散度条件, 如库伦规范 $\leftrightarrow \nabla \cdot \mathbf{A} = 0$
 - (mf) 在求解频域(freq)或瞬态(tr)问题时本身内在包含度规修复 (因为V未求解)
 - (mef) 本身未做规范
 - 稳态下度规修复可加可不加
 - 频域(freq)有时有必要设置度规修复

趋肤效应

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}}$$

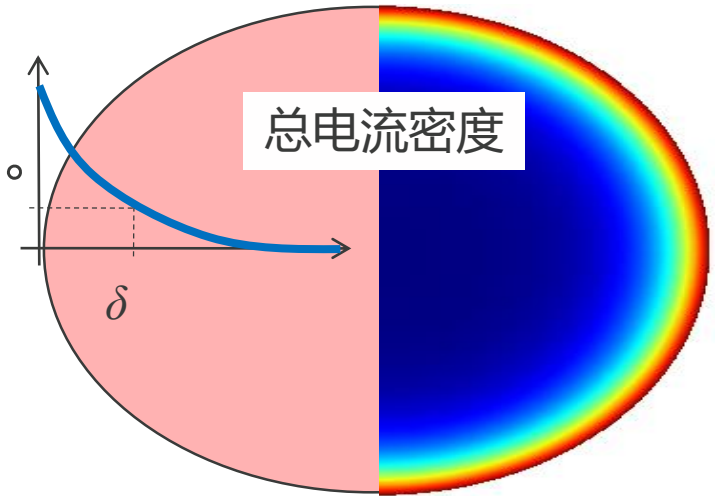
- 导体中的非稳态电流产生感应电流对总电流产生贡献。

$$j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e$$

- 总^{感应电流}电流密度 = 外部^{外部 (流入) 电流}电流密度 + 感应电流密度

- 我们无法直接描述总电流密度 \mathbf{J} ，因为它需要计算得到。

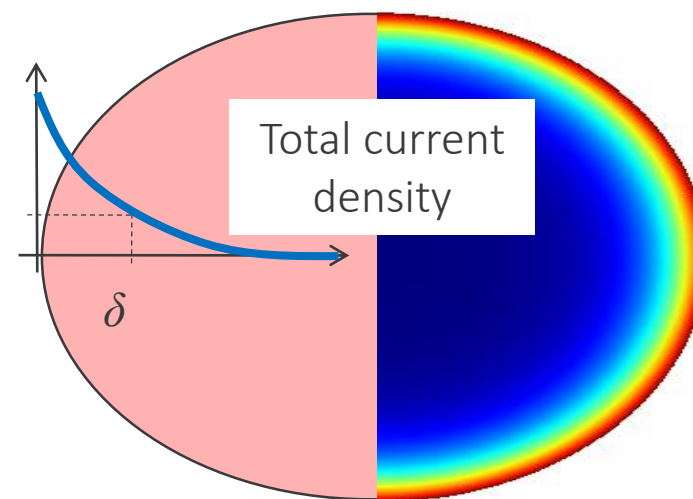
- 可以描述（定义）：
 - 外部电流密度
 - 穿过一个表面的总电流 I 。



趋肤效应

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}}$$

- 随着频率增加，电流主要集中在导体外表面附近。
- 如果分析完整的导体电流分布，需要确定网格能够解析趋肤深度大小。
- 甚至，可以忽略导体区域，只指定其表面电流密度大小。



表面电流密度
(A/m)

$$J_{total} = \frac{I}{2\pi r}$$

体电导率

$$\sigma = 0$$

感应涡流

50 Hz时的趋肤深度大小:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}}$$

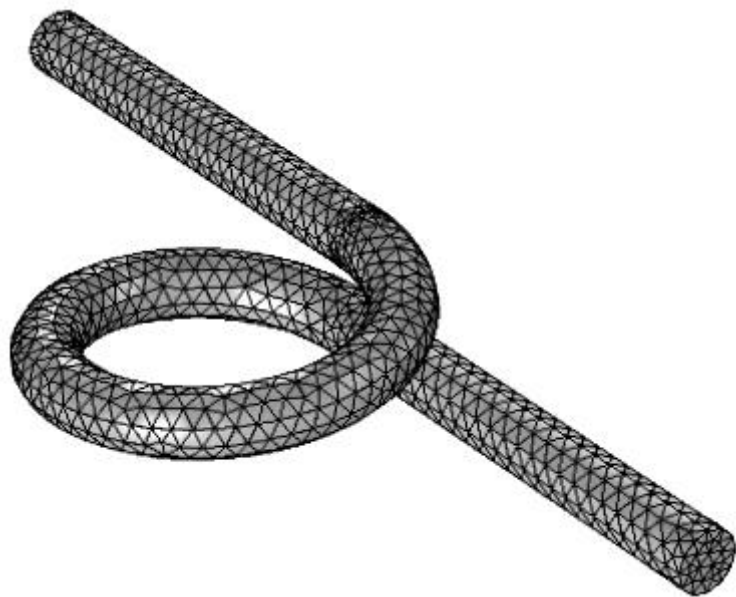
$$\left. \begin{array}{l} \mu_r = 1 \\ \sigma = 5.998 \cdot 10^7 \end{array} \right\} \Rightarrow \delta = 9 \text{ mm (Copper)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_r = 1 \\ \sigma = 3.774 \cdot 10^7 \end{array} \right\} \Rightarrow \delta = 12 \text{ mm (Aluminum)}$$

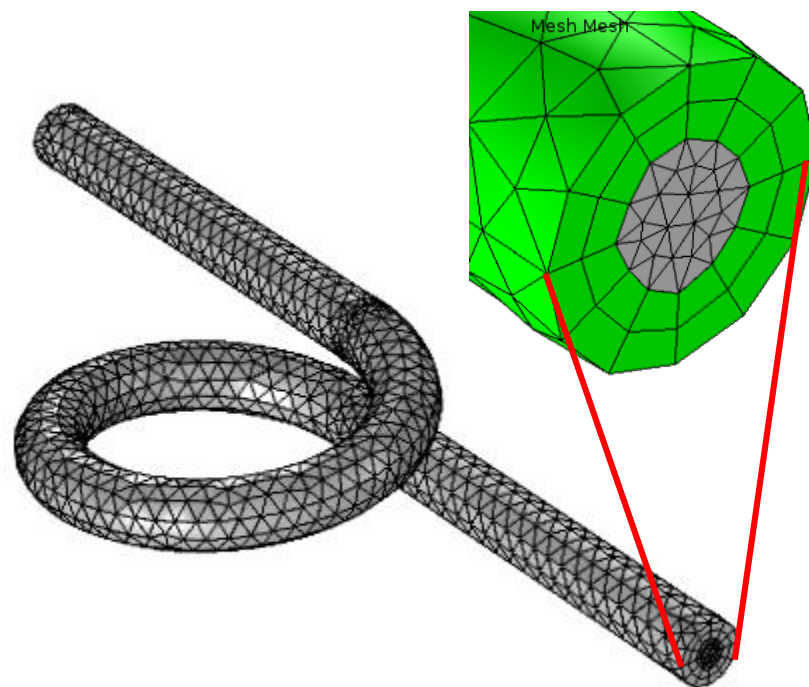
$$\left. \begin{array}{l} \mu_r = 1 \\ \sigma = 1.137 \cdot 10^6 \end{array} \right\} \Rightarrow \delta = 67 \text{ mm (Stainless Steel)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_r = 4000 \\ \sigma = 1.12 \cdot 10^7 \end{array} \right\} \Rightarrow \delta = 0.34 \text{ mm (Iron)}$$

网格注意事项



在直流问题中默认采用自由四面体网格



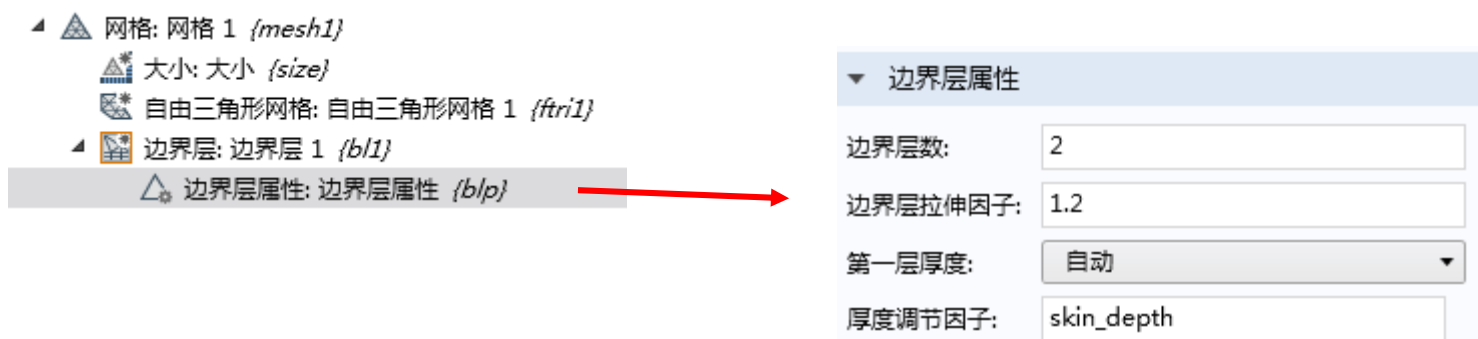
包含集肤效应的交变问题更适合采用边界层网格来解析，其中集肤深度小于导体截面尺寸

边界层网格解析集肤效应

- 集肤深度:

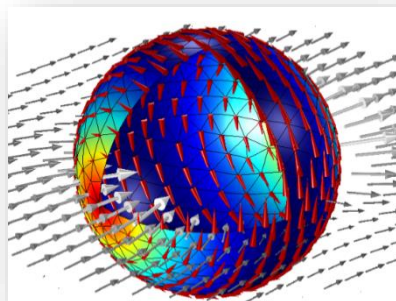
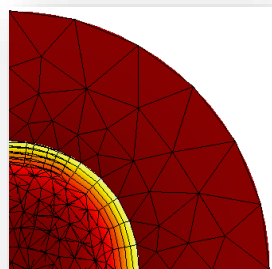
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

- 当集肤深度小于导体截面的一半时，可以考虑边界层网格
 - 沿导体壁面剖分两层网格即可
 - 每层网格厚度取集肤深度大小



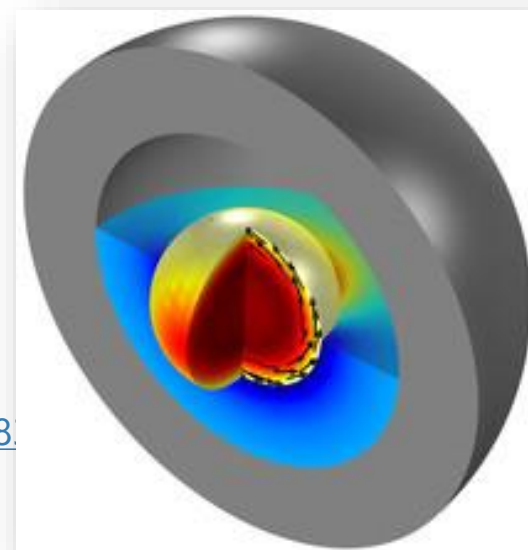
如何精确求解涡流？

- 如果 $\delta < L$
 - 边界层网格
 - 参考： <http://www.comsol.com/model/iron-sphere-in-a-20-khz-magnetic-field-12831>
- 如果 $\delta \ll L$
 - 阻抗边界条件
 - 参考： <http://www.comsol.com/model/iron-sphere-in-a-13-56-mhz-magnetic-field-12835>



如何模拟涡流和集肤效应？

- 如果 $\delta \gg L$
 - 无需考虑涡流
 - 电流接口、频域求解
 - 参考: <http://www.comsol.com/model/electric-impedance-sensor-7704>
- 如果 $\delta \sim L$ 或 $\delta < L$
 - 磁场接口、频域求解
 - 需要模拟分析整个球体结构
 - 参考: <http://www.comsol.com/model/iron-sphere-in-a-20-khz-magnetic-field-128>
- 如果 $\delta \ll L$
 - 磁场接口、频域求解
 - 近似认为涡流只在球体表面分布
 - 参考: <http://www.comsol.com/model/iron-sphere-in-a-13-56-mhz-magnetic-field-12835>



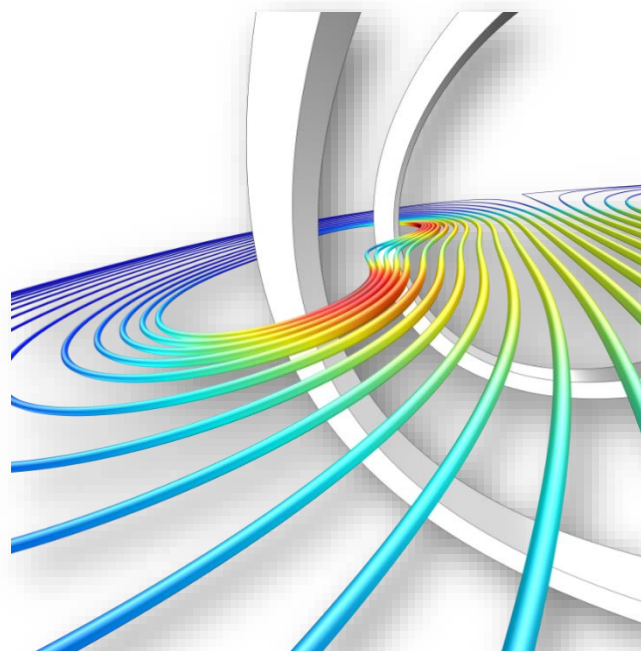
三维线圈专题

线圈特征应用

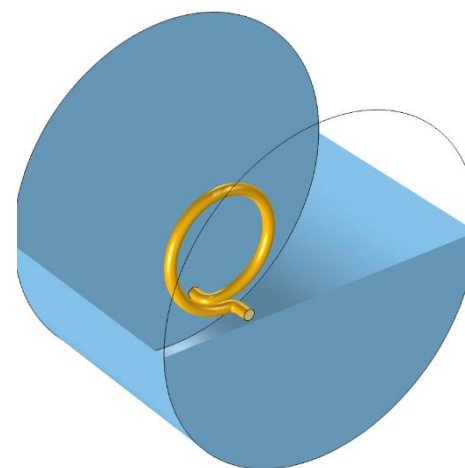
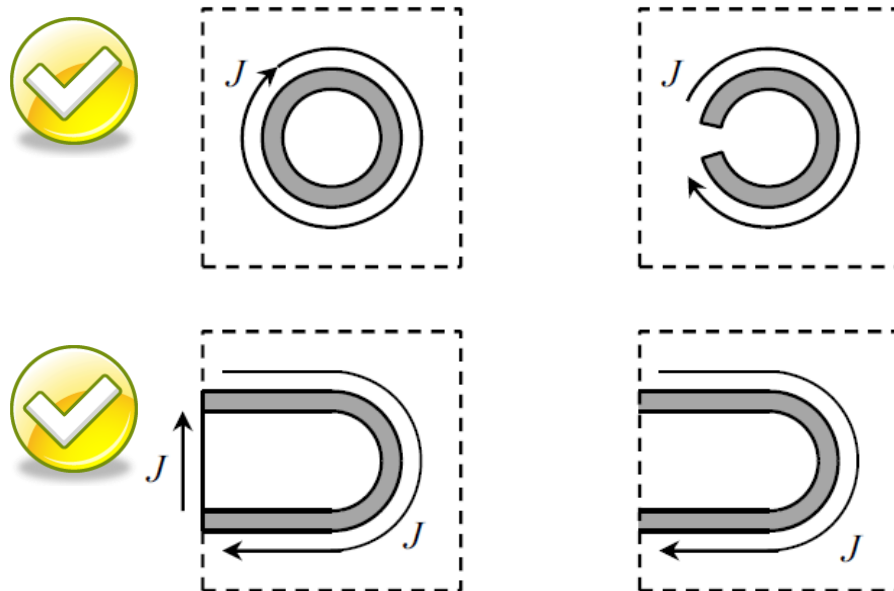
- 得到模型中的电流密度分布
- 计算集总参数： L , Z , Y , 和 S
- 与外电路耦合
- 根据建模目的选择线圈特征
 - 直流还是交流模拟？
 - 趋肤深度 vs. 导体尺寸/厚度 (单导体与均匀多匝线圈？)
 - 体与是面线圈？

线圈特征

- 单导体线圈，二维-三维
 - 二维、二维轴对称：直流，交流
 - 三维：全激励 (瞬态下应用电压激励)
- 均匀多匝线圈,二维-三维
 - 二维、三维：直流、交流
- RLC 线圈组，二维(轴对称)：
 - 直流交流
- 集总端口
 - 在导体之间插入传输线激励
 - 仅用于交流
- 集总单元
 - 在导体之间插入集总阻抗
 - 仅用于交流



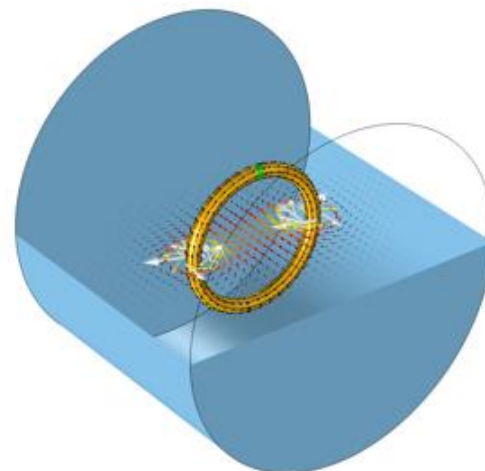
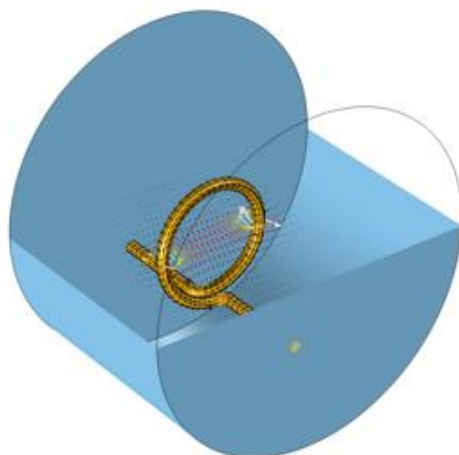
我们必须形成闭合的电流环



线圈在空气中断开，电流为非闭合环

- 使用闭合的几何
- 通过恰当的建模方法指定闭合的电流路径
- 对开几何应用恰当的边界条件

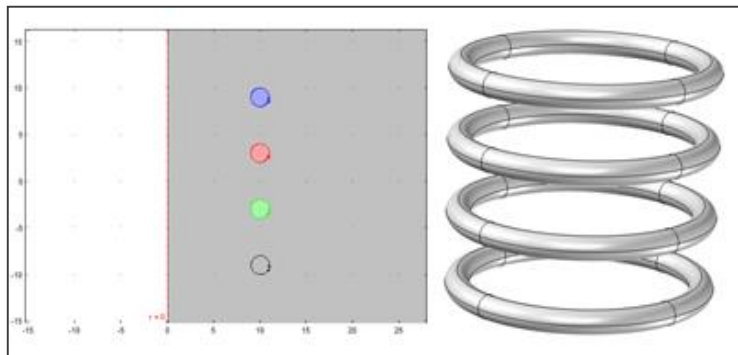
磁场建模时必须使用闭合电流环



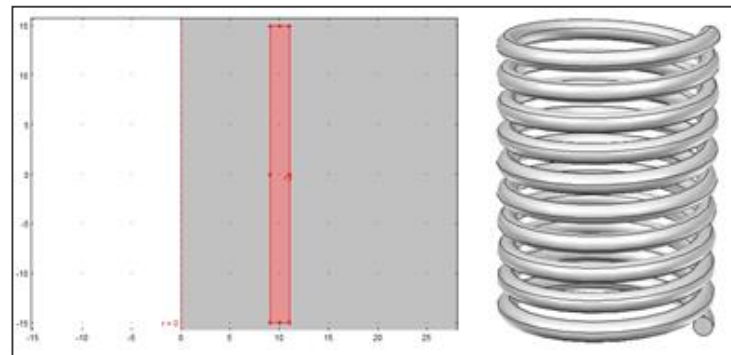
对开几何应用恰当的边界条件

<https://www.comsol.com/blogs/modeling-coils-in-the-acdc-module/>

2D-轴对称线圈模型



单匝线圈域



多匝线圈域

▼ 线圈

线圈名称:
1

导线模型:
单导线

☐ 线圈组

线圈激励:
电流

线圈电流:
 I_{coil} 1[A]

▼ 线圈

线圈名称:
1

导线模型:
单导线

☒ 线圈组

线圈激励:
电流

线圈电流:
 I_{coil} 1[A] A

▼ 均匀多匝导线

匝数:
 N 10

线圈导线电导率:
 σ_{coil} 6e7[S/m] S/m

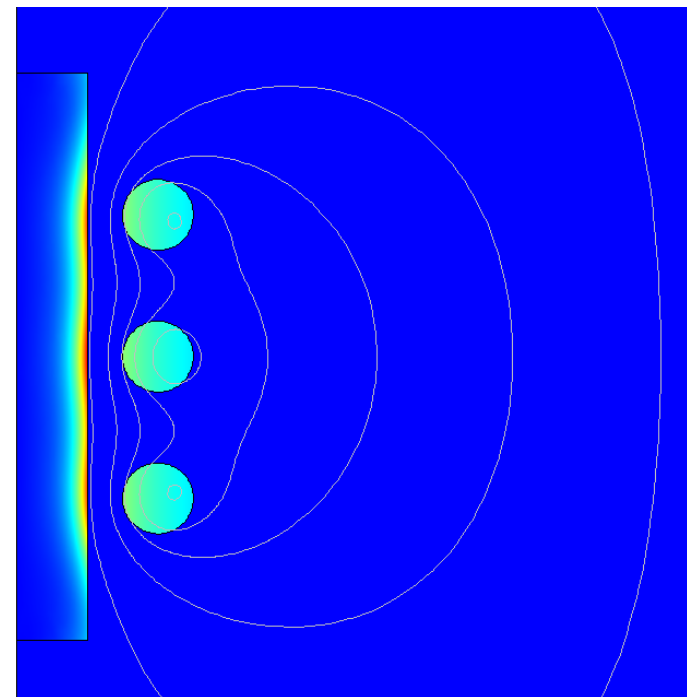
线圈导线截面积:
用户定义

a_{coil} 1e-6[m^2] m^2

线圈组

DEMO: 电磁感应

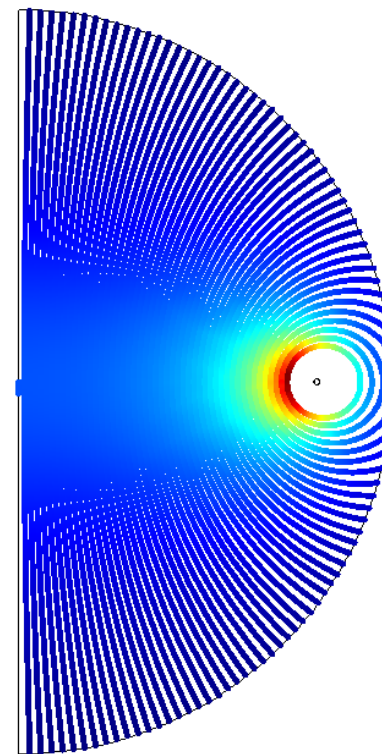
- 通电导线在铜柱中产生感应电流
- 计算电感参数、涡流、电磁损耗、磁力线等
- 后续：感应加热、热对流



<http://cn.comsol.com/model/inductive-heating-of-copper-cylinder-148>

练习：多匝线圈中的互感和感应电流

- 本例使用频域模型计算同心共面的一个单匝主线圈和一个 20 匝从线圈之间的互感和感应电流。从线圈通过平均方法来建模，而不考虑其中的每匝线圈。并将结果与解析预测值进行了比较。



<http://cn.comsol.com/model/mutual-inductance-and-induced-currents-in-a-multi-turn-coil-12687>

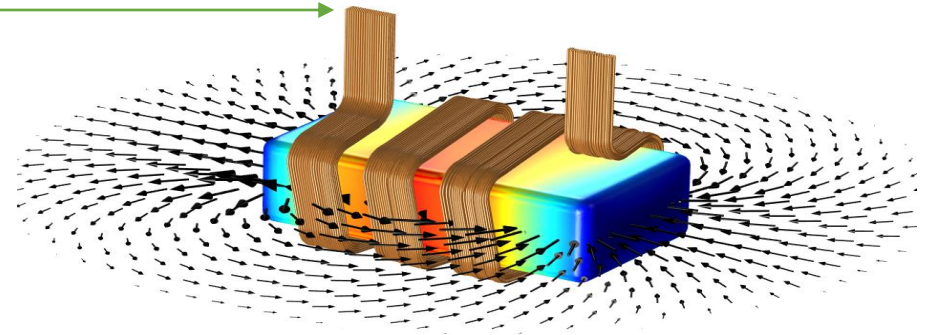
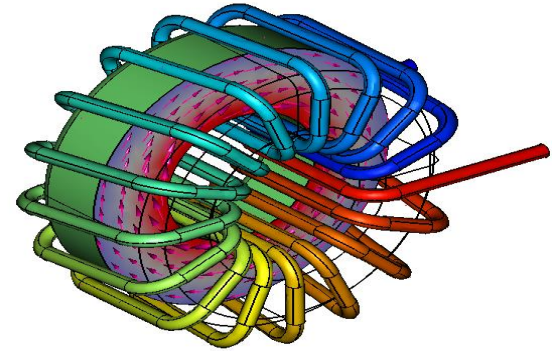
4 Types of current carrying conductors

- ACDC模块提供的几种线圈建模方法：

- 单导线线圈
- 均匀多匝线圈
- 外部电流密度
- 边电流

- 前两者仅用于ACDC模块，后两者可用于ACDC和RF模块

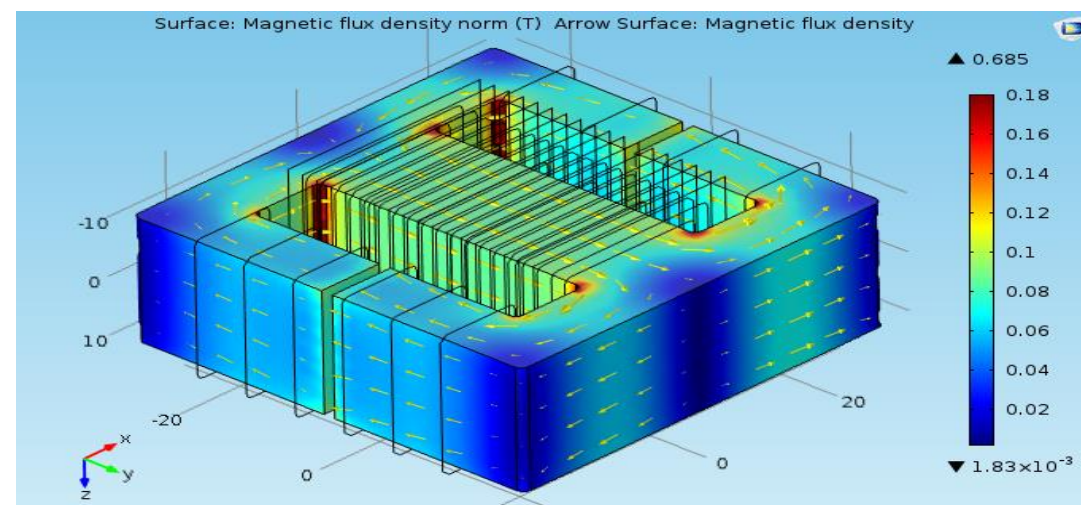
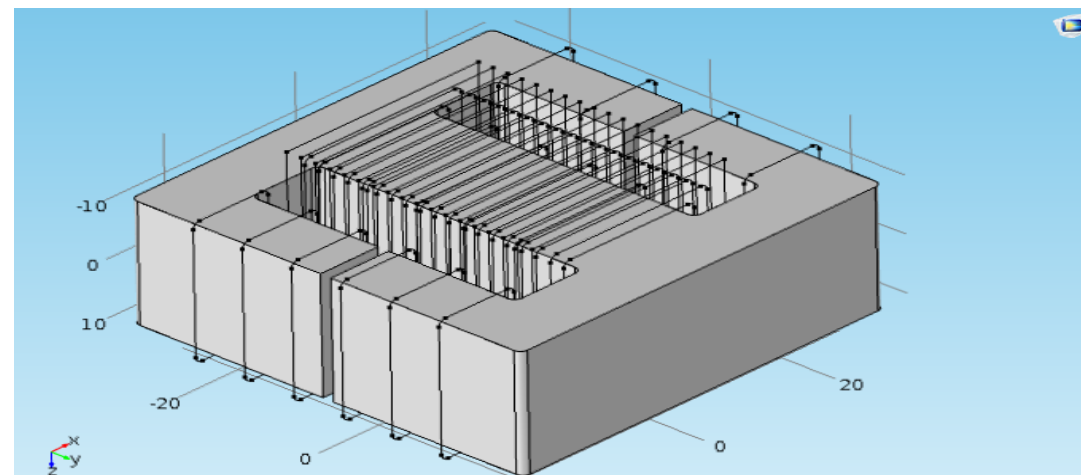
- 都需要进行空气域建模



边电流

- 非常细的线
 - 线圈本身不是关心目标
 - 不考虑导线电磁感应（涡流）
 - 前期模型分析
 - 导线附近存在奇点
- ➔ 尤其一些复杂模型建立前的初期模型中边电流条件是首选。

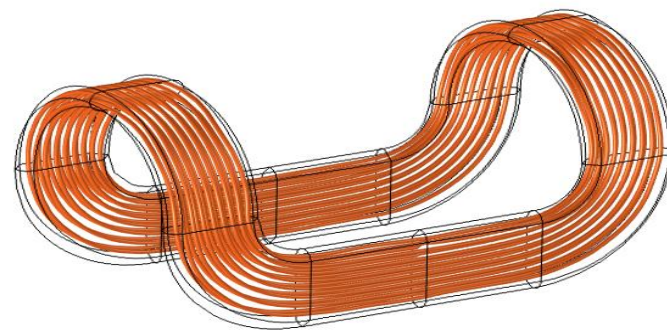
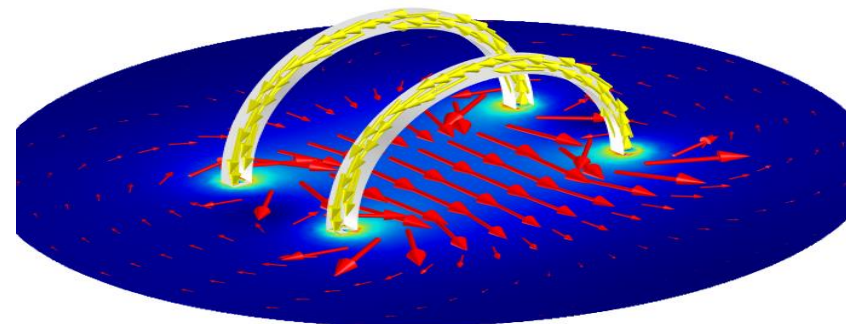
<http://cn.comsol.com/model/an-rfid-system-1264>



外部电流密度

- 通过解析公式指定电流密度
- 稳态模型计算
- 其他简单模型

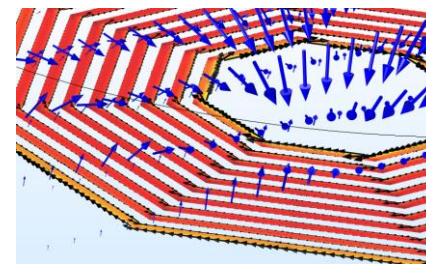
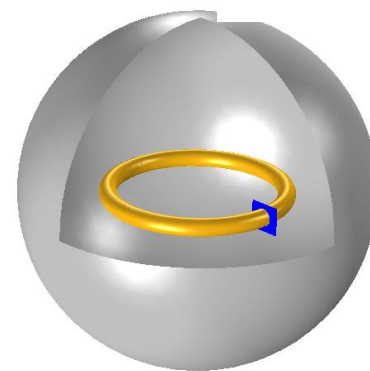
| External Current Density | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|---|------------------|
| External current density: | | | |
| J_e | $-J_0 \cdot z / \sqrt{x^2 + z^2}$ | x | A/m ² |
| | 0 | y | |
| | $J_0 \cdot x / \sqrt{x^2 + z^2}$ | z | |



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

线圈：单导线

- 用于单个实际导体（如，金属）的固体域进行建模，计算电流和磁场分布
- 得到导体内部或周围区域的磁场、电流（含趋肤效应）
- 用于几匝导体线圈建模
- 由于计算实际导线和线圈中的电流分布，需要较多的计算资源
- 电场沿线圈轴向积分得到集总电压大小
- 电流沿截面积分得到集总电流大小
- 注意：需要对导体周围的空气建模求解



单导线：求解类型

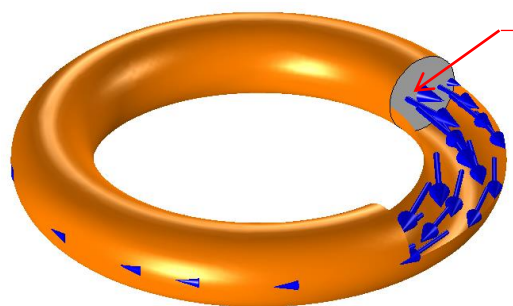
- 直流或稳态求解
- 频域：常用于周期性的激励源 (如，正弦波)
 - 相对于导体厚度不能忽略集肤深度
 - 集肤深度小于导体厚度，边界层网格
 - 如果集肤深度远小于($< 1/20th$)导体厚度，不再适合单导体线圈
- 时域（瞬态）：激励源随时间任意变化
 - 当前时域下仅支持电压激励源

注意：在交流（频域和时域）情况下，也可通过集总端口来等效单导体线圈

<http://cn.comsol.com/model/modeling-of-a-3d-inductor-10299>

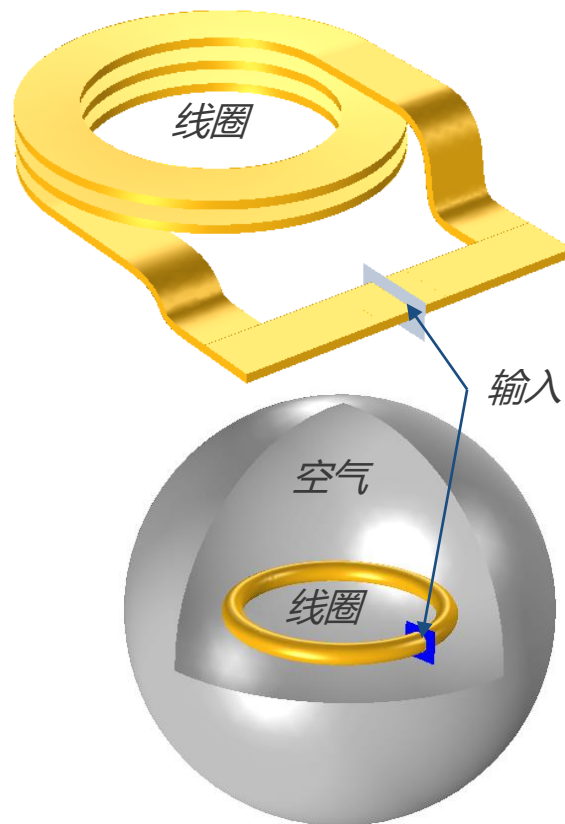
单导线线圈：闭合

- 用于单个或几匝线圈建模
- 无需对引线建模
- 几何上构成闭合环路
- 形状和截面可以任意
- 通过一个内部截面“输入”来定义激励源
- 需要在几何建模时创建出一个内部截面



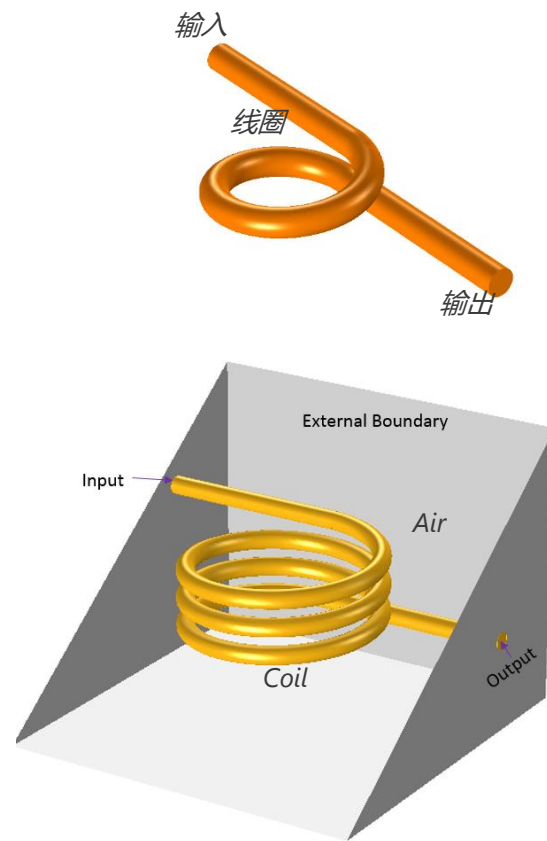
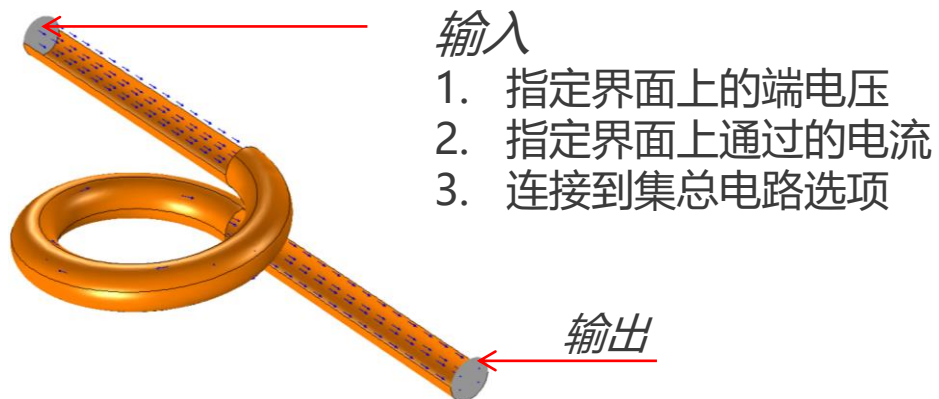
输入

1. 指定界面上的端电压
2. 指定界面上通过的电流
3. 连接到集总电路选项



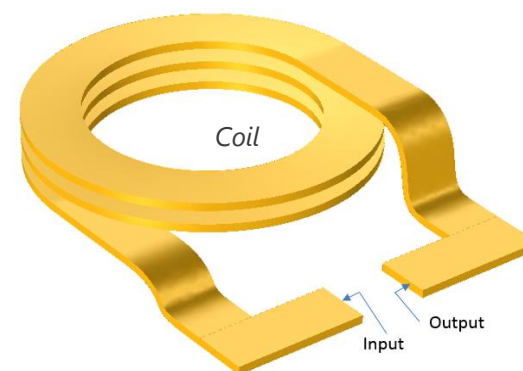
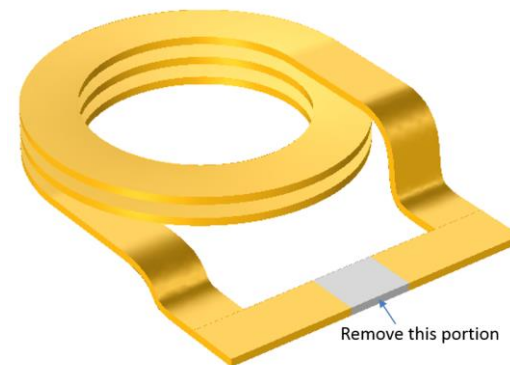
单导线线圈：断开

- 用于单个或几匝线圈建模
- 无需对引线建模
- 几何上没有形成闭合环路
- 形状和截面可以任意
- 通过“输入”和“输出”添加激励源
- 线圈末端在磁绝缘边界处终止来计算电流环路



单导线线圈：断开

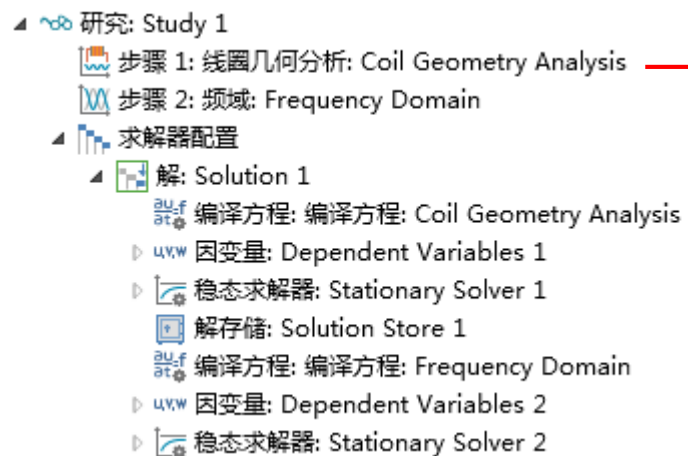
- 线圈几何可以由开环结构修改为闭环结构
- 在物理模型中（如，磁场接口）去除线圈几何中的部分结构
- 如右图所示，在线圈的任意末端应用“输入”和“输出”边界
- 去除部分的外边界会自动形成磁绝缘边界条件
- 磁绝缘边界条件可以看做理想导体或无损耗边界，形成电流的完整回路



更多参考：

<https://www.comsol.com/model/modeling-of-a-3d-inductor-10299>

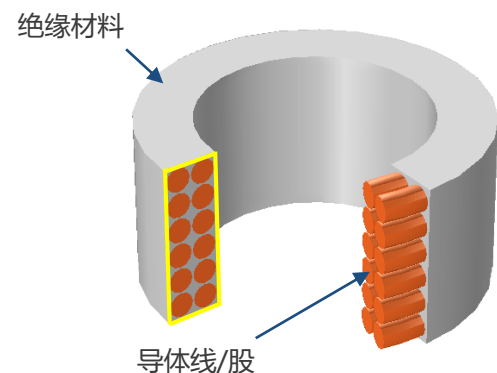
单匝线圈求解步骤



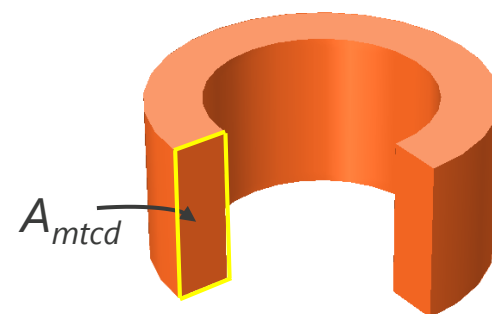
- 在研究1>研究步骤中手动添加添加该步骤
- 在研究分支中拖动该步骤，确保其位置在“步骤2：频域”上方
- COMSOL会自动配置最合适的求解器
- 在“线圈几何分析”选项中的线圈方向信息会自动添加到“频域”求解器中

多匝线圈域

- 以均匀的电流密度和方向模拟一块域
- 根据电流信息计算出导体周围磁场
- 适用于匝数较多的线圈
- 导线被绝缘层包裹 – 所以导线之间无电流流动
- 不考虑单根导线和层数
- **注意：磁场计算时需要在导体周围包裹空气**



在多匝线圈域中电流分布均匀



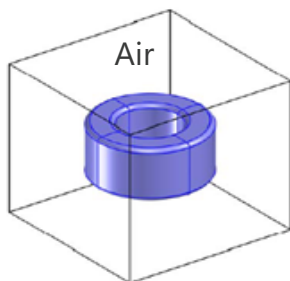
包含导体和绝缘材料的多匝线圈几何

三维均匀多匝线圈特征（续）

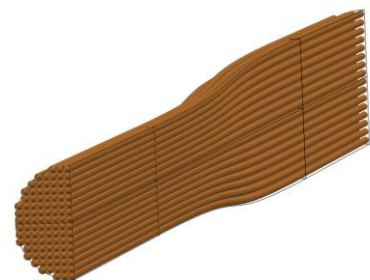
- 均匀多匝线圈几何创建
 - COMSOL不会检测绞线数目与均匀多匝线圈几何匹配，用户必须检查/修改线圈域几何来匹配实际的线圈匝数，绞线截面积周围绝缘材料信息参考下页
- 均匀多匝线圈特征中的材料分配
 - 传导电流（感应电流）假定只在导线中传输，为了防止感应电流在线圈域内流动，设定线圈域电导率为零。
 - 区域内的材料属性用于指定电位移和磁通密度相关的本构关系。
 - 创建或是选择材料属性来描述整个区域的本构关系，包括绞线和绝缘区域（而不是仅仅指定金属导线的材料属性）。
- 支持稳态、频域和瞬态求解



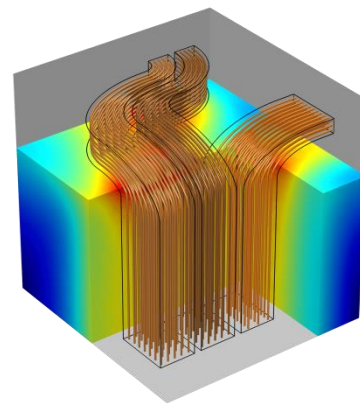
实际线圈几何



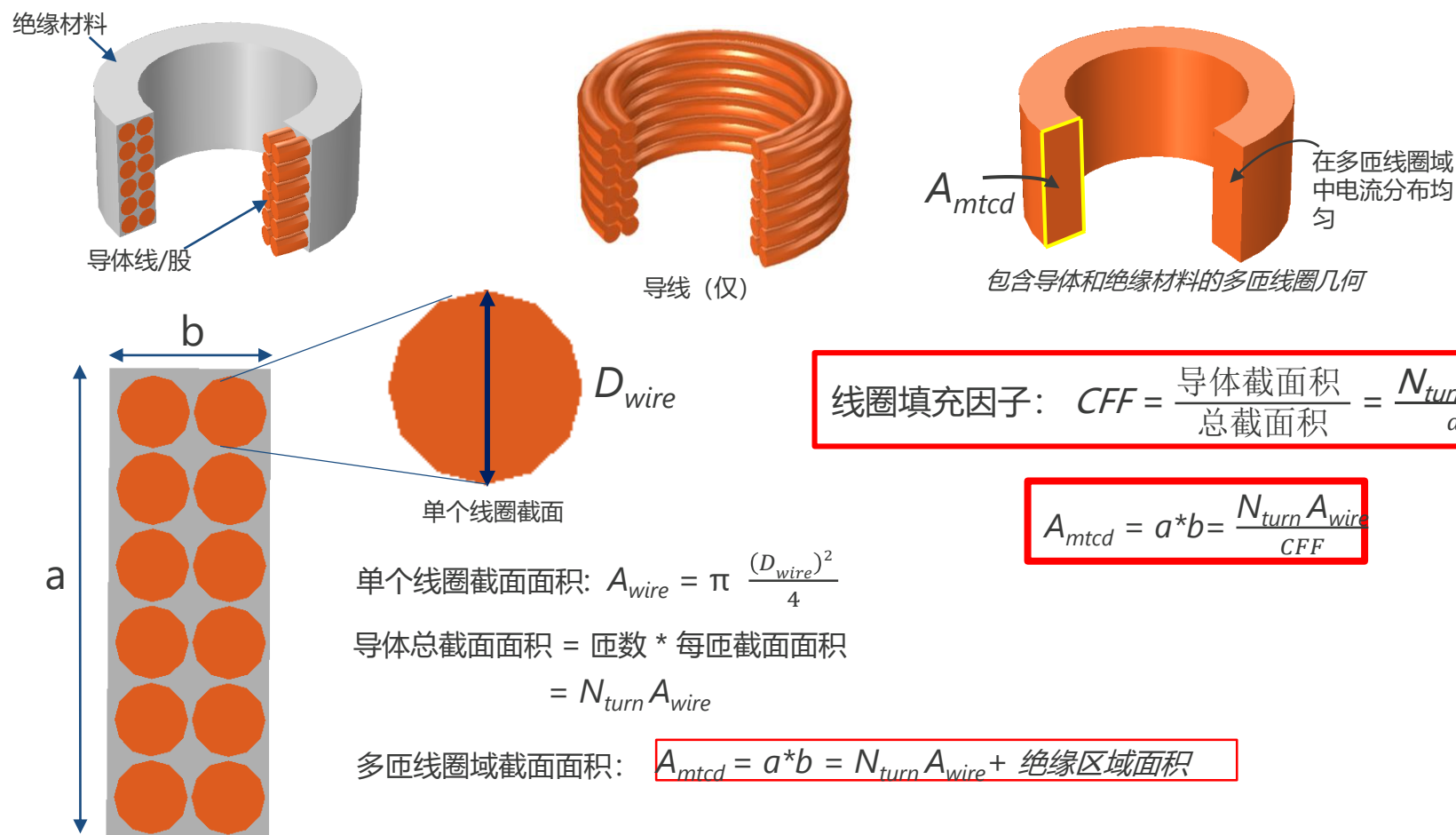
COMSOL中要计算的均匀多匝线圈



非均匀截面线圈



如何获取均匀多匝线圈几何



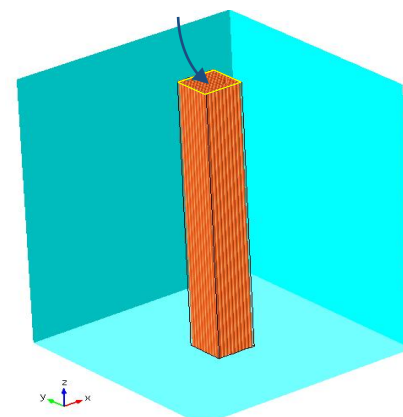
$$\text{线圈填充因子: } CFF = \frac{\text{导体截面积}}{\text{总截面积}} = \frac{N_{turn} A_{wire}}{a * b}$$

$$A_{mtcd} = a * b = \frac{N_{turn} A_{wire}}{CFF}$$

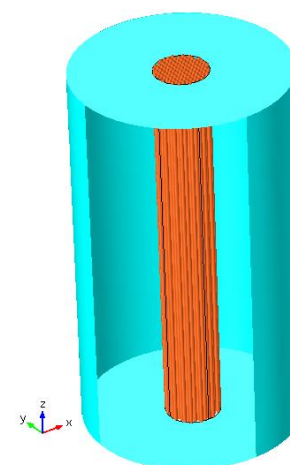
注意: 确保 $A_{mtcd} \geq N_{turn} A_{wire}$, COMSOL® 中默认不检查该项设置。

均匀多匝线圈-线性

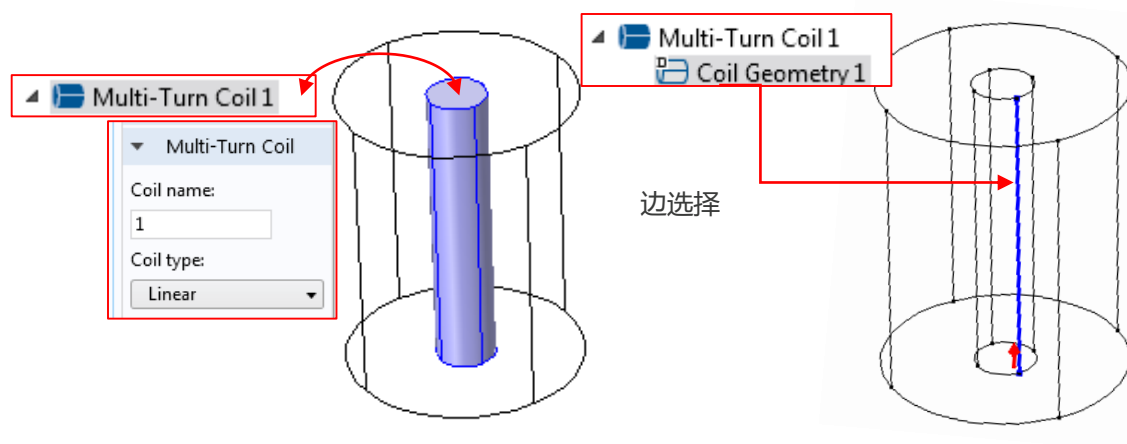
- 用来描述多匝平行直导线捆束在套筒（如，方形或圆形）中的情况。
- 几何无需构成闭合回路，但存在平直纵轴。
- 两个终端面须与空气域的外部边界接触。
- 横截面任意。
- 通过“线圈几何”子节点下的“边选择”指定电流流动方向。



线性方形线圈

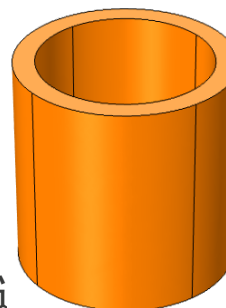


线性圆形线圈



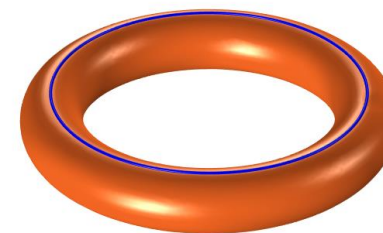
均匀多匝线圈-圆形

- 多匝导线按照圆形缠绕，放置在陶瓷或绝缘材料中
- 几何必须构成闭合环路，具有平直的纵轴
- 线圈横截面必须构成环形（柱形或环形线圈）
- 通过“线圈几何”子节点中的“边选择”（可以是多条边）指定电流方向，所选几何边必须是闭合环路（在扇形线圈中指定圆环的一部分）
- 通过选择的几何边计算得到线圈的平均长度

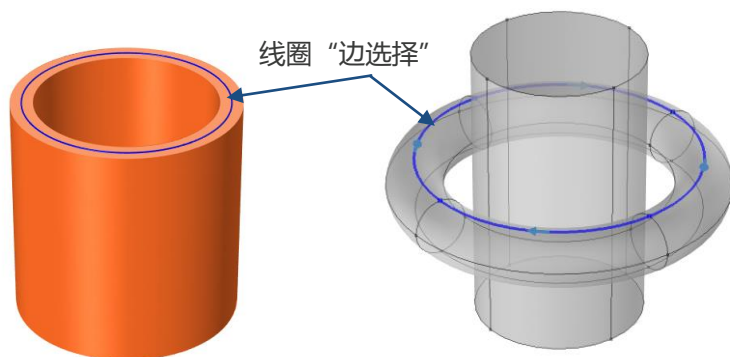


柱形线圈

合环路（在扇形线圈



环形线圈



在柱形或环形线圈中的正确的边选择方式

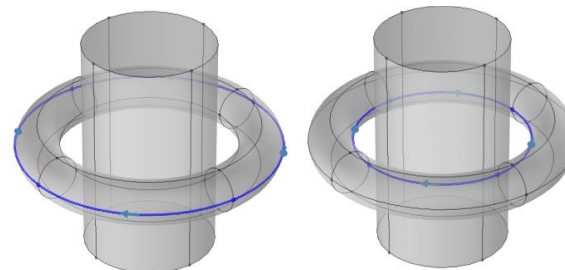
$$L = \oint_{coil\ edge} l \cdot dl$$

$$R = \frac{NL}{\sigma_{coil} A_{coil}}$$

N = 线圈匝数

σ_{coil} = 导线电导率

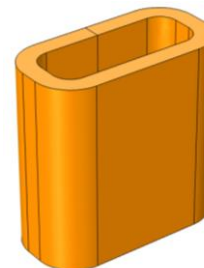
A_{coil} = 单个导线横截面面积



错误的几何边选择方式

均匀多匝线圈-数值

- 线圈截面为任意形状
- 线圈截面可沿电流方向变化
 - 可进行圆角处理，最好不要在横截面上形成尖角
- 在内部截面上通过“几何分析”子节点下的“输入”（仅用于闭合型线圈）条件添加激励源
 - 在模型几何中构建出内边界来添加“输入”
 - “输入”边界上的箭头表示电流方向，勾选设置窗口中的“反向”可得到相反的电流方向
- 仅取部分线圈建模时，需在对称切面上指定合理的边界条件（完美磁导体或磁绝缘）
- 在“几何分析”节点下的“对称明细表”中指定线圈长度和面积倍增因子
- 需要添加“线圈几何分析”研究步骤来计算线圈域的电流方向

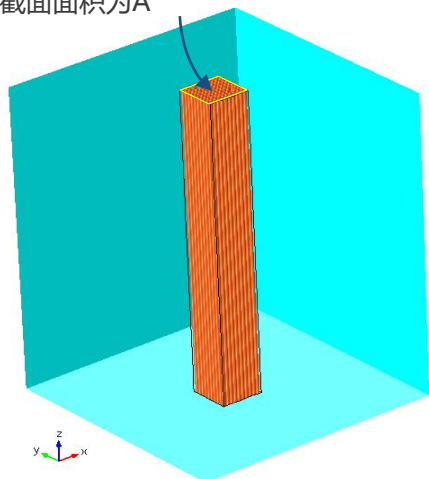


如何选择不同的线圈？

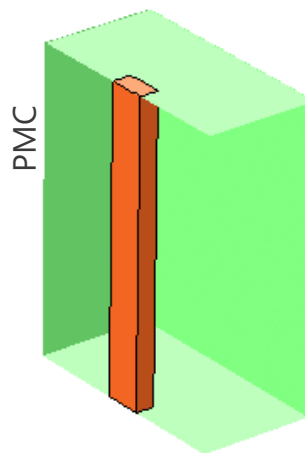
- 线性或圆形线圈均为特殊形状线圈
- 可以用数值线圈来分析线性或圆形线圈
- 记住，数值线圈时需要添加“线圈几何分析”求解步骤

对称：三维均匀多匝线圈（线性）

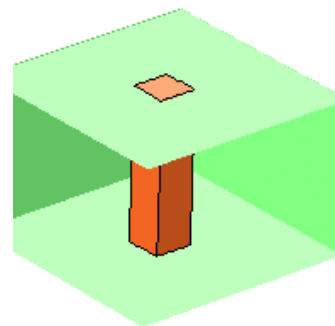
截面面积为A



线性线圈

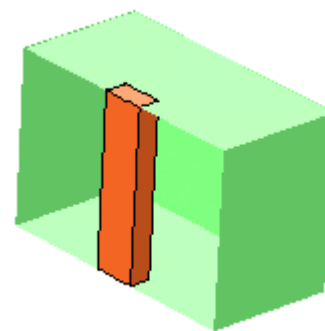


竖直切面：一半截面



水平切面：长度一半

PMC



竖直和水平切面：截面和长度各取一半

线圈：线圈 1 {coil1}
线圈几何：线圈几何 1 {cre1}

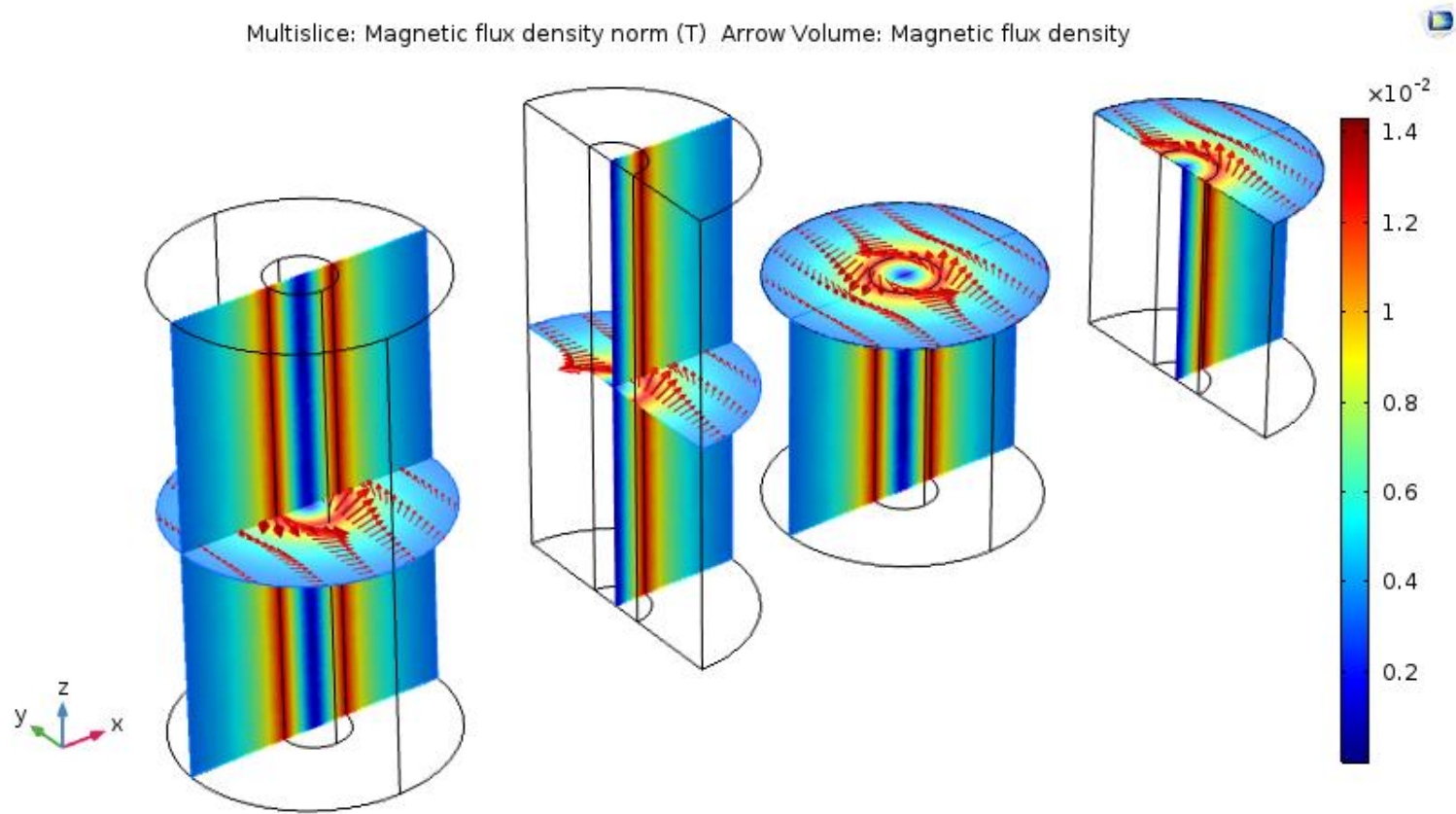
— 对称明细
线圈长度倍增因子:
 F_L 1 1
线圈面积倍增因子:
 F_A 2 1

— 对称明细
线圈长度倍增因子:
 F_L 2 1
线圈面积倍增因子:
 F_A 1 1

— 对称明细
线圈长度倍增因子:
 F_L 2 1
线圈面积倍增因子:
 F_A 2 1

注意：当取一半截面的对称结构时，对称面应用完美磁导体（PMC）

DEMO: 三维多匝线圈 (线性)

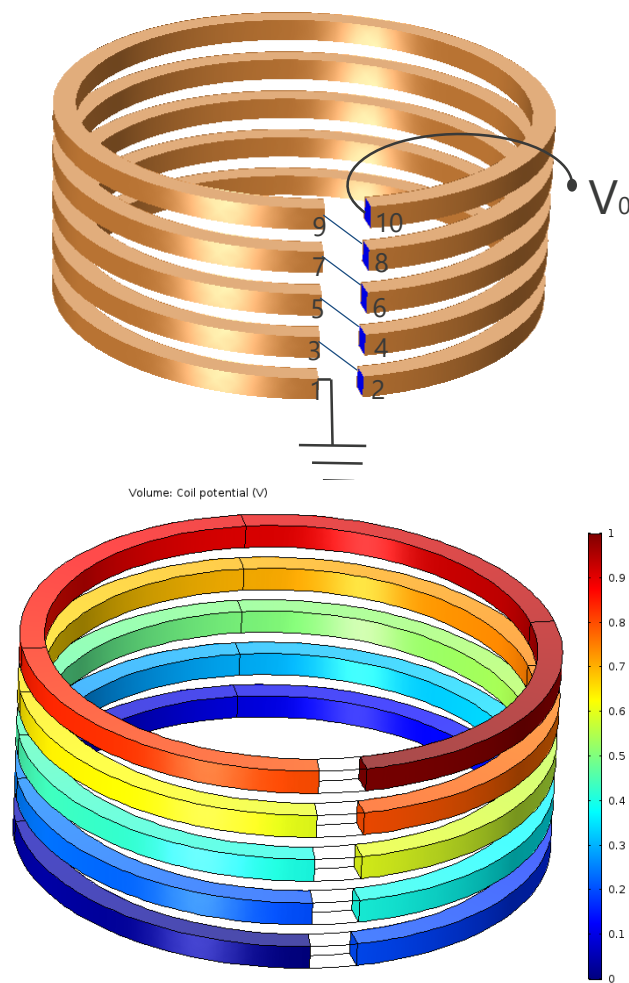


补充：串联线圈

- 五个环形导体构成串联回路
- 应用单导体线圈特征，选择五个区域
- 边界关系如下表所示

| 边界 | 功能 |
|-----|--------|
| 1 | 输出 |
| 2-3 | 与边界1相连 |
| 4-5 | 与边界2相连 |
| 6-7 | 与边界3相连 |
| 8-9 | 与边界4相连 |
| 10 | 输入 |

注意：在磁场接口中去除一部分后才能添加“输入”和“输出”。



补充：集总端口-单匝线圈

- 切出导体一小部分区域用作集总端口
- 指定该小区域材料为‘空气’，剩余区域指定为‘铜’或其他导体材料
- 可以应用边界层网格

▼ 集总端口属性

集总端口名称:
1

集总端口类型:
用户定义

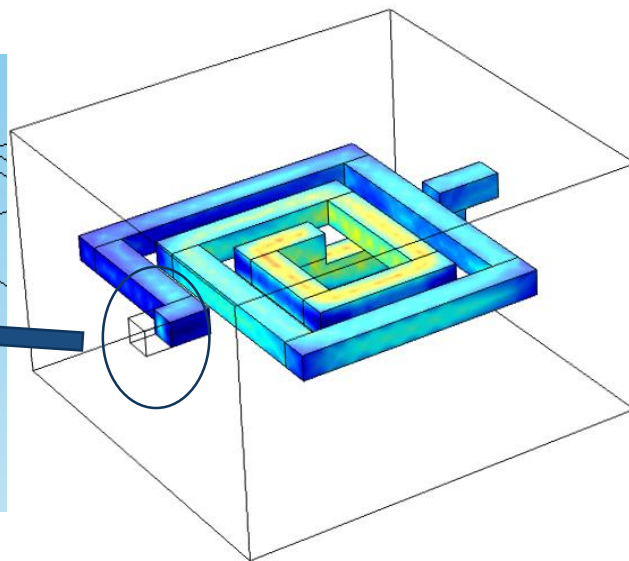
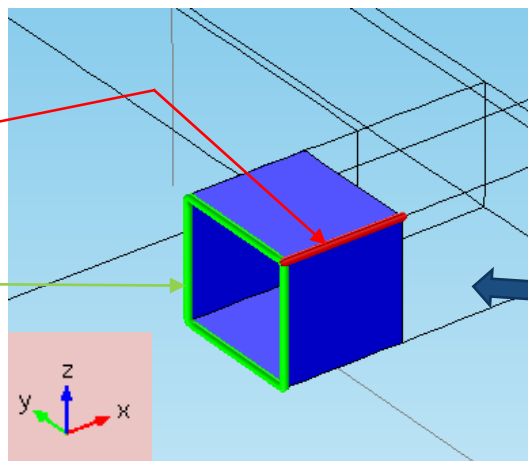
集总端口高度:
 h_{port} 20[um] m

集总端口宽度:
 w_{port} $2 \cdot (22[\text{um}] + 20[\text{um}])$ m

集总端口终端间的方向:

| | |
|---|---|
| 1 | x |
| 0 | y |
| 0 | z |

终端类型:
电流



注意：集总端口可以用于线圈末端，确保线圈与外部磁绝缘边界相连，以形成电流闭合回路。

<https://www.comsol.com/model/modeling-of-a-3d-inductor-10299>

频域和时域模拟

- 对于周期性信号尽量用频域求解：
 - 线性问题
 - 相对容易求解
- 多匝线圈域适用于趋肤深度大于单根导线截面尺度的情形
- 只有信号为非周期性时才采用瞬态计算（如脉冲）：
 - 非线性问题
 - 求解时间和内存消耗都更大

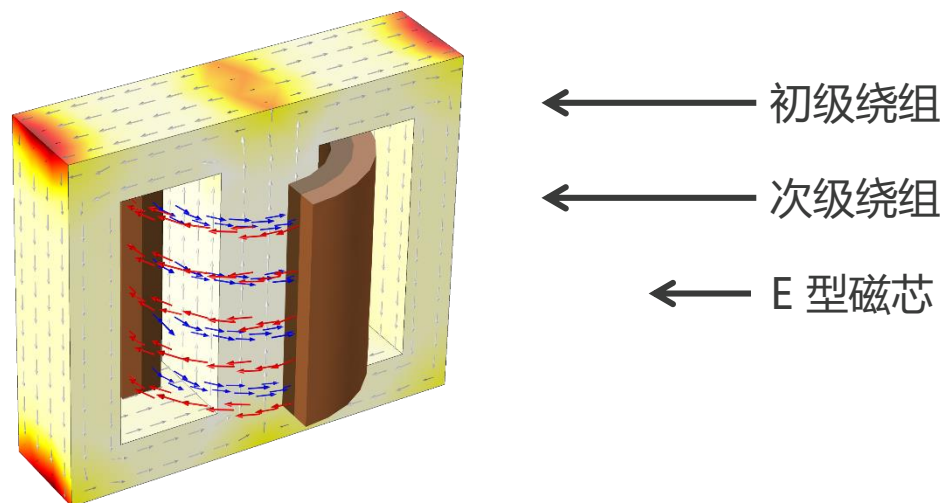
频域下 3D 多匝线圈域的收敛性

- 对空气使用非零电导率(>0):
 - 能降低刚度矩阵的奇异性
 - 一般设置 $1[\text{S/m}]$
 - 值取得小则求解时间更长
 - 值取得过高会影响结果
- 有时需要度规修复:
 - 在域上添加度规修复节点
 - 选择安培定律和多匝线圈区域
 - 保证数值解的唯一性



练习：E 型磁芯单相变压器

- 50 Hz 下完全非线性时域分析求解感应电压
- 磁芯使用非线性磁性材料（有饱和效应）
- 绕组处理为线圈束，不仿真每匝导线



<http://cn.comsol.com/showroom/gallery/5700/>

<http://cn.comsol.com/model/computation-of-losses-in-a-three-phase-power-transformer-54471>

三维线圈学习案例

- <http://cn.comsol.com/model/multi-turn-coil-above-an-asymmetric-conductor-plate-13777>
- <http://cn.comsol.com/model/e-core-transformer-14123>
- <http://cn.comsol.com/model/modeling-of-a-3d-inductor-10299>
- <http://cn.comsol.com/model/axisymmetric-approximation-of-3d-inductor-46611>
- <http://cn.comsol.com/model/magnetic-field-of-a-helmholtz-coil-15>

Day3 End

support@comsol.com