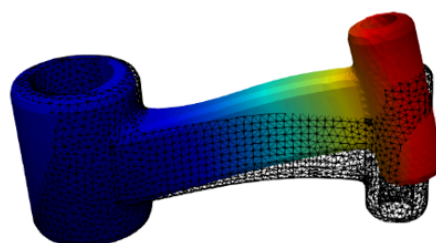
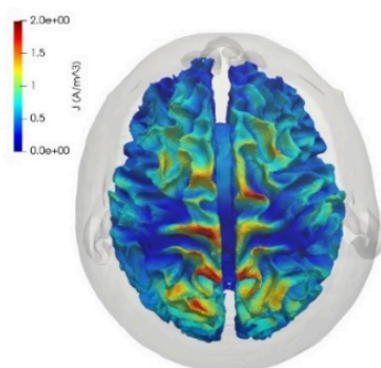
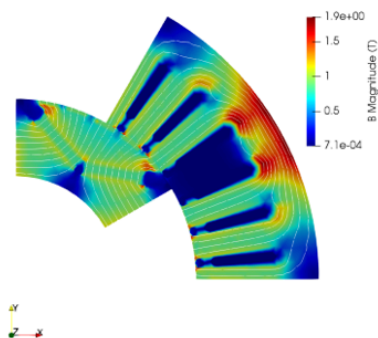
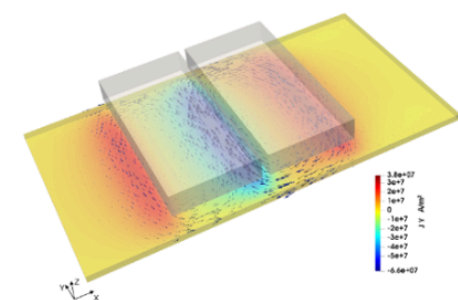


EMPbridge电磁及多物理耦合分析软件平台

V 1.26

用户手册



目录

1. EMPbridge简介

2. EMPbridge的安装及界面说明

- 2.1. EMPbridge的安装说明
- 2.2. EMPbridge界面介绍
- 2.3. EMPbridge仿真分析流程简介

3. 软件启动及工程创建

- 3.1. 软件启动
- 3.2. 新建工程
- 3.3. 保存工程
- 3.4. 打开工程
- 3.5. 关闭工程

4. 问题类型设置 (Problem type)

4.1. 二维问题类型设置

4.1.1. 二维单物理场分析说明

- 4.1.1.1. 静电场分析 (2D Electrostatic [es])
- 4.1.1.2. 恒定电流场分析 (2D SteadyCurrent [sc])
- 4.1.1.3. 静磁场分析 (2D Magnetostatic [ms])
- 4.1.1.4. 频域准静磁场分析 (2D QuasiMagnetostatic [qms])
- 4.1.1.5. 时域准静磁场分析 (2D QuasiMagnetostatics Transient [qmst])
- 4.1.1.6. 频域准静态电场分析 (2D QuasiElectroStatic [qes])
- 4.1.1.7. 稳态热场分析 (2D Heat Conduction Steady [hcs])
- 4.1.1.8. 瞬态热场分析 (2D Heat Conduction Transient [hct])
- 4.1.1.9. 静力学分析 (2D Elastostatic [elst])
- 4.1.1.10. 瞬态动力学分析 (2D Elastodynamic Transient [eldt])
- 4.1.1.11. 受迫振动分析 (2D Forced Period Response [fvbr])

4.1.2 轴对称问题分析说明

4.1.3 二维多物理场耦合分析说明

- 4.1.3.1. 频域准静磁场-稳态热场分析 (2D QuasiMagnetostatic-HeatStationary Multiphysics [mp-qms-hcs])
- 4.1.3.2. 静磁场-弹性静力耦合分析 (2D MagnetoStatic-Elastostatic Multiphysics [mp-ms-elst])

4.2. 三维问题类型设置

4.2.1. 三维单物理场分析说明

- 4.2.1.1. 静电场分析 (3D Electrostatic [es])
- 4.2.1.2. 恒定电流场分析 (3D SteadyCurrent [sc])
- 4.2.1.3. 静磁场分析 (3D Magnetostatic [ms])
- 4.2.1.4. 频域准静磁场分析 (3D QuasiMagnetostatic [qms])
- 4.2.1.5. 时域准静磁场分析 (3D QuasiMagnetostatics Transient [qmst])
- 4.2.1.6. 频域准静态电场分析 (3D QuasiElectroStatic [qes])
- 4.2.1.7. 稳态热场分析 (3D Heat Conduction Steady [hcs])
- 4.2.1.8. 瞬态热场分析 (3D Heat Conduction Transient [hct])
- 4.2.1.9. 静力学分析 (3D Elastostatic [elst])
- 4.2.1.10. 瞬态动力学分析 (3D Elastodynamic Transient [eldt])
- 4.2.1.11. 受迫振动分析 (3D Forced Period Response [fvbr])
- 4.2.1.12. 稳态压电分析 (3D PiezoElectric Steady [pzes])
- 4.2.1.13. 频域压电分析 (3D PiezoElectric Steady [pzes])
- 4.2.1.14. 瞬态压电分析 (3D PiezoElectric Transient [pzet])
- 4.2.1.15. 模态分析 (3D Modal Analysis[ma])

4.2.2. 三维多物理场耦合分析说明

- 4.2.2.1. 恒定电流-瞬态热场分析 (3D SteadyCurrent-HeatTransient Multiphysics [mp-sc-hct])
- 4.2.2.2. 频域准静磁场-瞬态热场分析 (3D QuasiMagnetostatic-HeatTransient Multiphysics [mp-qms-hct])

4.2.2.3. 时域准静磁场-瞬态热场分析 (3D QuasiMagnetostatic Transient-HeatTransient Multiphysics [mp-qmst-hct])

4.2.2.4. 静磁场-弹性静力分析 (3D Magnetostatic-Elastostatic Multiphysics [mp-ms-elst])

4.3. 对偶方法选择

4.4. 敏感度分析设置

5. 参数设置 (Parameter)

5.1. 参数设置界面

5.2. 参数设置说明

6. 几何建模设置 (Geometry)

6.1. 几何模型的导入与储存

6.1.1. 几何模型导入

6.1.2. 几何模型储存

6.2. 草图绘制

6.3 2D 几何建模

6.3.1 2D 几何模块

6.3.2 2D 几何布尔操作

6.4. 3D 几何建模

6.4.1. 3D 几何模块

6.4.2. 3D 几何布尔操作

6.5. 几何选取

6.6. 几何分组

7. 网格剖分 (Mesh)

7.1. 网格导入和导出

7.1.1 网格导入

7.1.2 网格导出

7.2. 网格剖分设置

7.3. 显示指定区域的网格

7.4. 网格模式下的拾取和高亮

8. 物理特性设置 (Physics)

8.1. 材料设置 (Material)

8.1.1. 材料库

8.1.2. 从材料库导入和导出材料

8.1.3. 非线性材料

8.1.4. 温变材料特性

8.2. 边界条件设置 (Boundary condition)

8.2.1. 单物理场分析中的边界条件设置

8.2.1.1. 添加边界条件

8.2.1.2. 查看边界条件

8.2.1.3. 编辑边界条件

8.2.1.4. 删除边界条件

8.2.2. 多物理耦合分析中的边界条件设置

8.2.2.1. 添加边界条件

8.2.2.2. 查看边界条件

8.2.2.3. 编辑边界条件

8.2.2.4. 删除边界条件

8.3. 激励设置 (Excitation)

8.3.1. 单物理场分析中的激励设置

8.3.1.1. 添加激励

8.3.1.2. 编辑激励

8.3.1.3. 删除激励

8.3.2. 多物理耦合分析中的激励设置

8.3.2.1. 添加激励

8.3.2.2. 编辑激励

8.3.2.3. 删除激励

8.4. 特殊设置 (Specific setting)

8.5. 运动设置 (Motion)

8.5.1. 平动(Translation setting)

8.5.2. 转动(Rotation setting)

8.6. 端口设置 (Port)

8.6.1. 场路连接端口External Circuit z (2D)

8.6.2. 电容提取端口Capacitance Extraction (3D)

8.6.3. 电感提取端口Inductance Extraction (3D)

8.7. 外电路设置 (External circuit)

9. 求解器设置 (Solve)

9.1. 求解器界面与参数设置

9.2. 求解器类型选择

9.3. 时域/频域问题参数设置

10. 后处理设置 (Postprocess)

10.1. 二维场图

10.1.1. 二维场图绘制设置

10.1.2. 二维场图绘制几何区域的选择

10.1.3. 云图

10.1.4. 矢量图

10.1.5. 等位线图

10.1.6 力学形变图

10.1.7 动画显示

10.2. 三维场图

10.2.1. 三维场图绘制设置

10.2.2. 三维场图绘制几何区域的选择

10.2.3. 云图

10.2.4. 矢量图

10.2.5. 力学形变图

10.2.6. 切面图

10.2.7. 动画显示

10.3. 曲线与表格

10.4. 全局量输出

10.4.1. 体积分

10.4.2. 切面积分

10.4.3. 等效电容/电感/电阻参数输出

10.4.4. 敏感度分析

11. 案例库说明

12. 附录

12.1. 符号说明

1. EMPbridge简介

EMPbridge 为电磁-结构-热多物理耦合分析软件平台，1.26 版本主要支持以低频为主的电磁场计算以及电-热和磁-力的多物理场耦合分析。

目前主要支持的分析类型和应用场景列举如下：

二维、三维有限元通用电磁分析

- **静电场分析 (Electrostatics)**

根据已知电荷和电压激励计算静态电场分布，可用于绝缘设备、电缆、电容器等电工设备和集成电路互连线、封装、PCB板等电子设备的设计与分析，并可用于等效电容参数的提取。

- **时域准静电场分析 (Transient Quasi-Electrostatics)**

当电场变化足够缓慢（频率极低或时间尺度远大于电磁波传播时间）时，磁场效应（如感应电动势）可忽略，此时准静电场近似成立，可用于分析工频交流电压下绝缘介质中的电场分布，如变压器、电缆或电容器的绝缘性能评估、可用于研究高压直流电缆中电荷积累与电场畸变过程。

- **恒定电流传导分析 (Steady Current Conduction)**

分析由电压或电流激励在导体内部建立的恒定电流场分布，可用于接地线、电缆等电工设备和集成电路互联线、封装、PCB板等电子设备的设计与分析，并可用于等效电阻参数的提取。

- **静磁场分析 (Magnetostatics)**

分析由恒定电流或永磁体激励产生的静磁场分布，可用于永磁电机、电缆等电工设备和集成电路互联线、封装、PCB板等电子设备的设计与分析，并可用于等效电感参数的提取。

- **频域准静磁场分析 (Quasi-Magnetostatics)**

分析时谐变化的电流激励所产生的磁场分布及其变化，考虑集肤和邻近效应，以及准静磁场损耗等，可用于变压器、电机等电工设备和电力电子器件、集成电路互连线、PCB板等电子器件的设计和分析。

- **时域准静磁场分析 (Transient Quasi-Magnetostatics)**

计算低中频电磁场暂态过程，可用于分析变压器、电机等电工设备的暂态过程和开关效应，以及分析电力电子设备的脉冲响应等。

- **电磁力计算**

在中低频电磁场分析（静电场、静磁场、时域/频域准静磁场）中支持电磁力的计算，可对二维/三维节点电磁力的分布进行分析。

- **支持涉及各向异性/非线性材料的分析**

在磁场分析（时域/频域准静磁场）中支持采用各向异性/非线性的磁性材料（由B-H曲线描述材料特性）。

- **含二维机械运动的场分析**

支持机械运动（平动或转动）下的场分析，无需重新剖分网格。

- **轴对称问题分析**

支持平行平面场和轴对称两种模式下的二维分析。

电路参数提取

- 寄生电容、电阻、电感的参数提取
- 电工器件电容、电阻、电感的参数提取

场路耦合分析

- 设备和器件中电磁场和外电路的耦合分析, 1.26 版本暂时仅支持二维问题中电压激励的设置。

参数化仿真

- 1.26版本支持针对频率、速度等单参数的参数扫描分析。

二维三维有限元热传导场分析

- **稳态热传导 (Stationary Heat Transfer)**
分析面热源、体热源激励下的温度分布。
- **瞬态热传导 (Transient Heat Transfer)**
分析面热源、体热源激励下的暂态热传导过程。

二维三维有限元结构分析

- **静力学分析 (Static Elasticity)**
分析线弹性结构在位移约束、外荷载下的应力应变场分布。
- **频域受迫振动分析 (Forced Period Response)**
分析线弹性结构在周期变化荷载下的周期动力学响应, 1.26 版本中仅支持二维频域受迫振动分析。
- **振动模态分析 (Modal Analysis)**
- **瞬态动力学分析 (Dynamic Elasticity)**
分析线弹性结构在随时间变化荷载下的动力学行为。

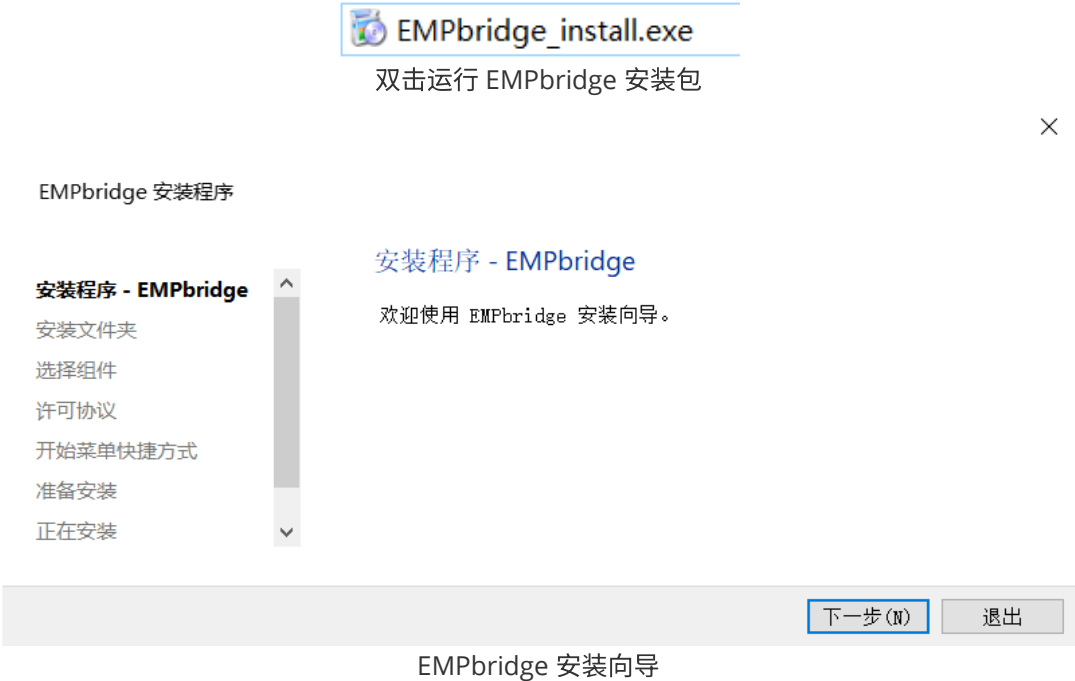
电磁相关多物理场耦合分析

- **电磁-热传导耦合计算**
分析外加电流或涡流损耗引起的热效应, 考虑多时间尺度及材料的温变效应。
- **电磁-应力耦合计算**
分析电磁力引起的结构应力和变形。
- **压电效应**
分析压电材料在压电效应下的结构应力和变形, 1.26版本中仅支持三维压电效应的分析。

2. EMPbridge的安装及界面说明

2.1. EMPbridge的安装说明

双击运行 EMPbridge_install.exe 打开软件安装向导。



点击下一步，设置安装路径。



点击下一步，选择安装组件。



选择安装组件

单击下一步，阅读并勾选接受许可选项。

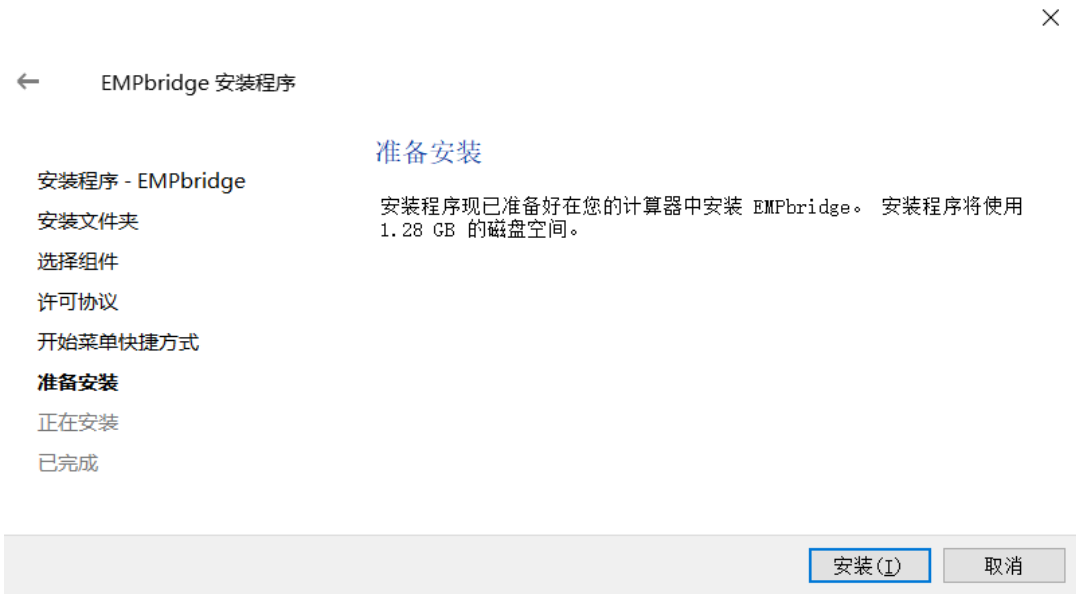


阅读并接受用户许可协议

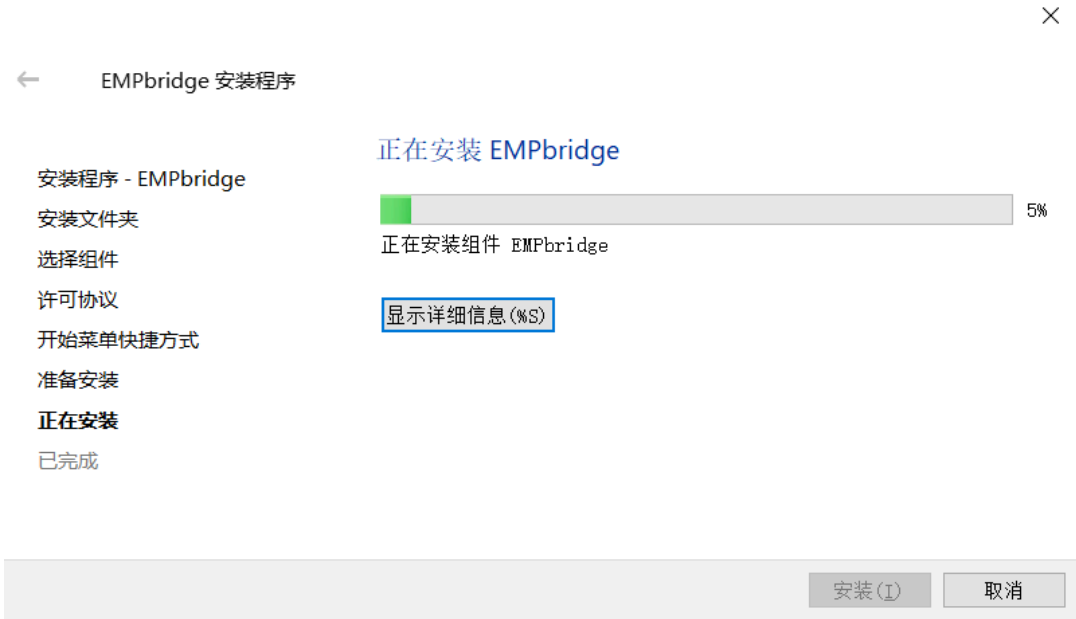
点击下一步设置开始菜单快捷方式所在目录的名字，一般保持默认。继续下一步，确认磁盘空间并点击下一步进行安装。在安装界面将显示安装进度，安装完毕后点击完成结束安装。



设置快捷方式名字



确认磁盘空间足够并开始安装



安装过程显示安装进度

EMPbridge 安装程序

安装程序 - EMPbridge

安装文件夹

选择组件

许可协议

开始菜单快捷方式

准备安装

正在安装

已完成

正在完成 EMPbridge 向导

单击 完成(F) 退出 EMPbridge 向导。

完成(F)

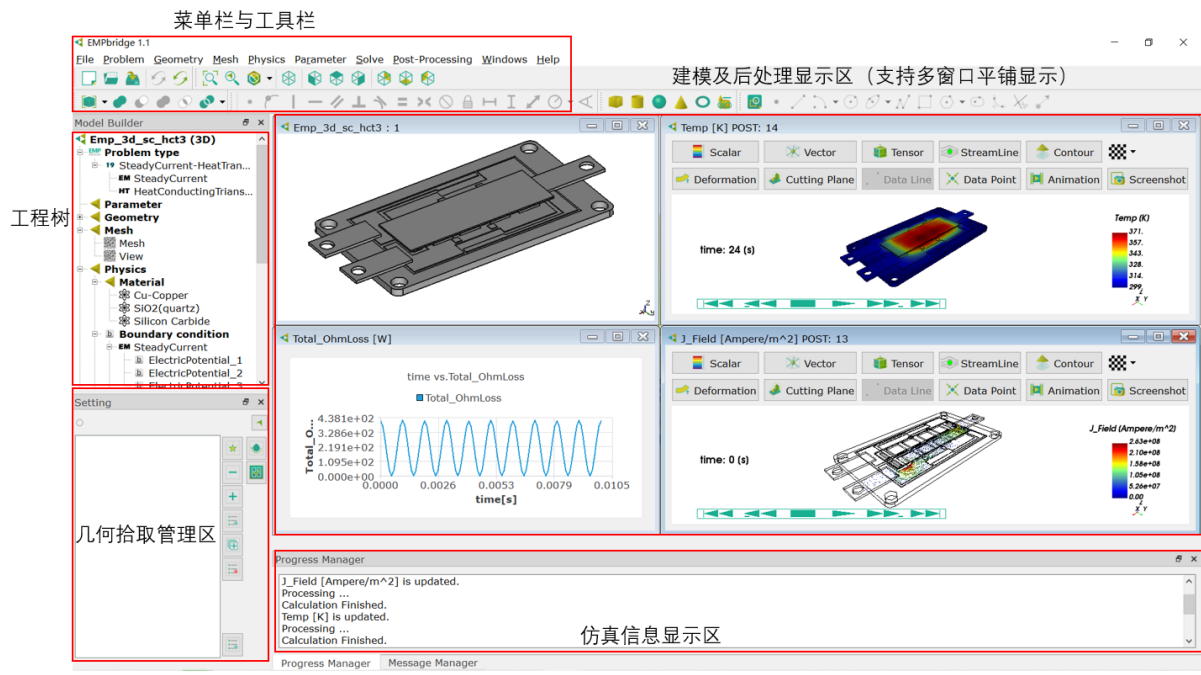
安装完成

安装完毕后点击开始菜单中的 EMPbridge 快捷方式运行程序，或者运行安装目录下bin文件夹下的 EMPbridge.exe 也可打开 EMPbridge软件平台。

初次运行软件可能会因为缺少一些依赖项/依赖库而不能正常运行，可以联系我们获得帮助。

2.2. EMPbridge界面介绍

如下图所示，EMPbridge的界面主要分为四部分，分别为上方的菜单栏和工具栏，左侧的工程树，中间的建模及后处理显示窗口和下方的仿真信息显示窗口。



EMPbridge界面

在菜单栏中，用户可以完成工程文件的打开、保存与关闭操作，还可以进行仿真参数的设置，其完成的功能与在左侧工程树上直接设置相同。建议用户直接在工程树上进行设置，以完成清晰、连贯的仿真建模流程。工具栏会根据仿真设置的不同阶段，切换显示该阶段所需的按钮，以保持用户界面的简洁。例如：在点击工程树上的Geometry节点后，将显示与几何建模相关的按钮，当点击Mesh节点后，则几何建模相关按钮自动消隐。

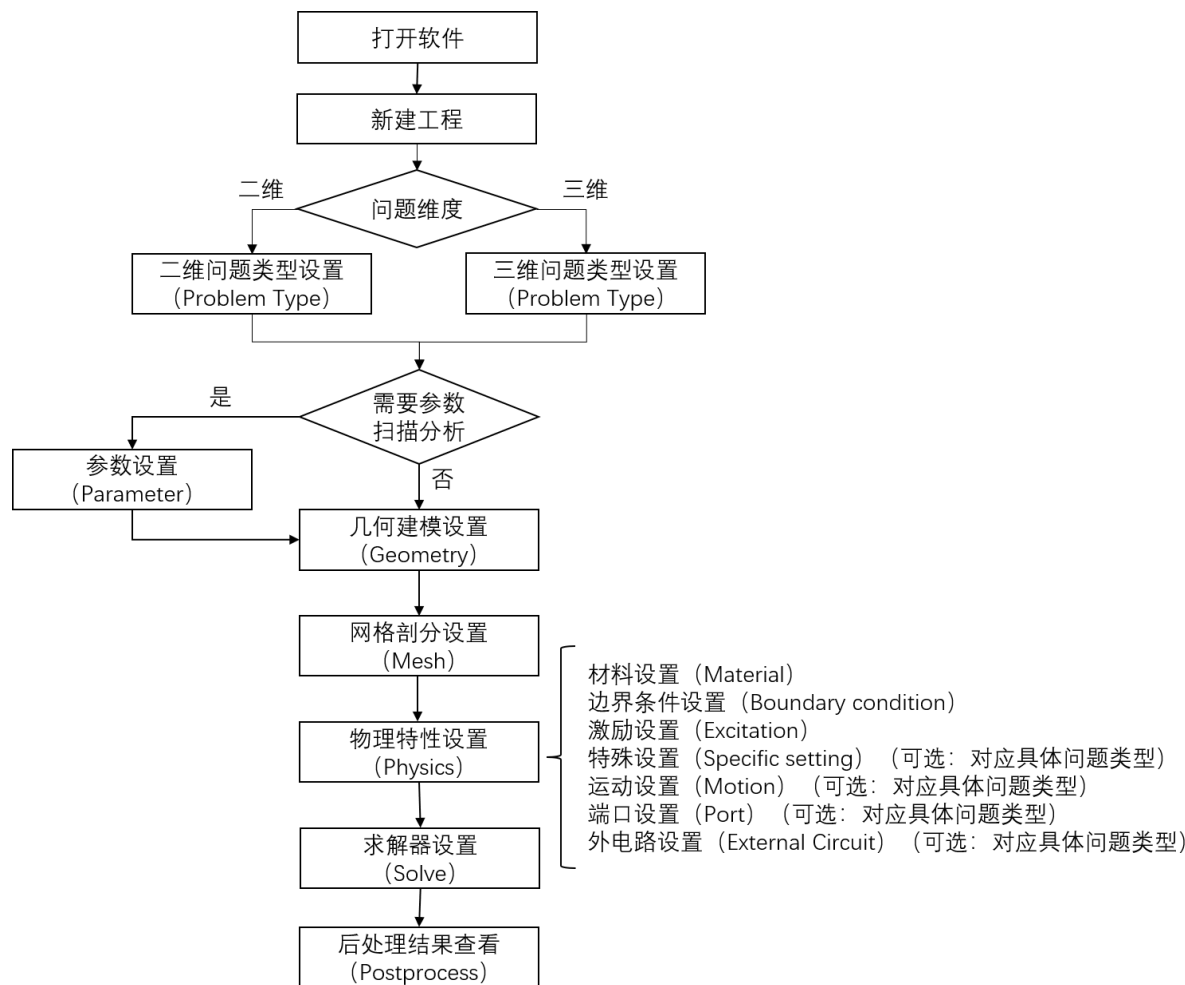
在左侧工程树窗口中，用户按照从上到下的顺序依次进行仿真分析设置，建立整个仿真流程。关于仿真流程的说明请见2.3节。

中间的区域为建模窗口和后处理结果窗口的显示区域，平台支持多窗口的平铺显示，方便查看和对比仿真结果。

下方的区域为仿真信息显示区域，其中会显示求解的进度、求解器输出的信息和报错信息。

2.3. EMPbridge仿真分析流程简介

EMPbridge的仿真分析流程如下图所示：



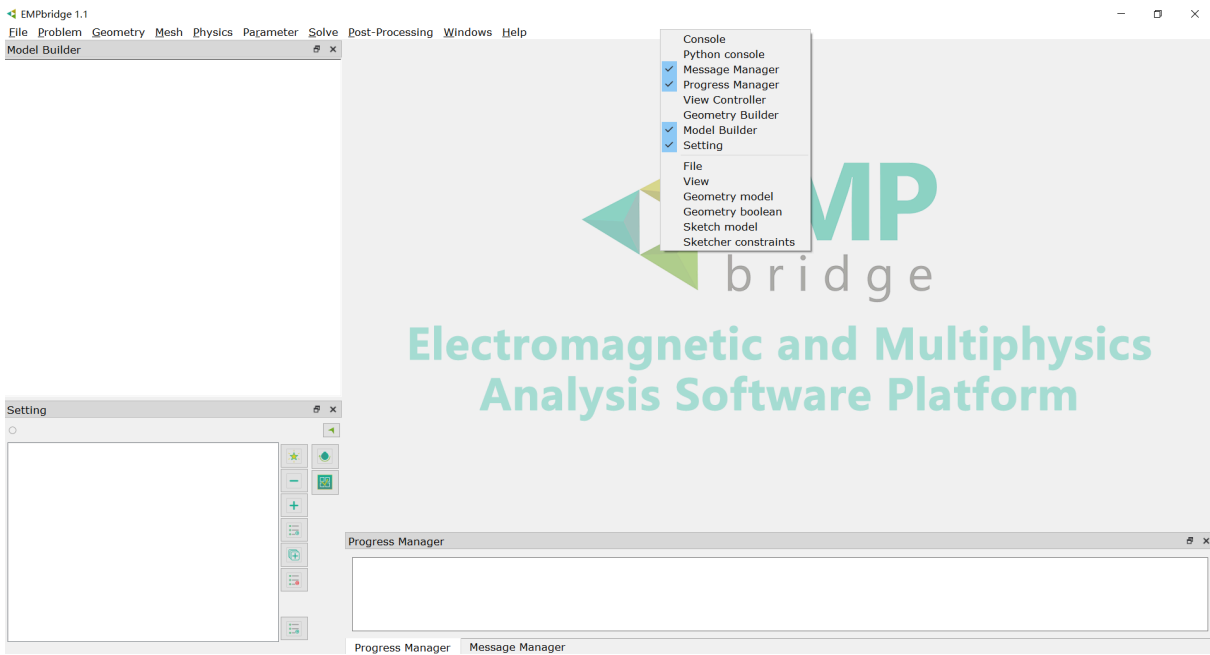
EMPbridge仿真分析流程

EMPbridge仿真分析流程与左侧工程树上的节点顺序相对应，用户依次将工程树上各节点设置完毕后即完成整个仿真流程设置。首先，用户打开软件，并新建工程，选择求解二维或三维问题。接下来进行问题类型的设置，软件平台根据选择的问题维度自动筛选出二维或三维问题对应的可供求解的物理场问题，用户根据需要选择单场或多物理场耦合问题进行分析。下一步用户如果有参数扫描分析的需求则进行参数设置，否则直接进行几何建模设置。在几何建模设置部分，用户可以利用EMPbridge软件平台直接建立二维或三维几何模型，也可以通过文件导入平台建立好的或者其他商业软件建立好的几何模型。接下来是网格剖分设置，同样既可以对平台建立的几何模型进行剖分，也可以直接导入商业软件剖分得到的网格文件，如果直接导入网格文件，可以省略几何建模设置。网格剖分完毕后进行物理特性设置，其中包含七个小项，分别为材料设置、边界条件设置、激励设置、特殊设置、运动设置、端口设置和外电路设置。其中特殊设置、运动设置、端口设置和外电路设置为可选项，针对具体问题类型才开放设置。例如，特殊设置用来选择涡流、力或铁心损耗的求解区域，只有在涉及涡流、力或铁心损耗的问题中才开放设置，同时用户也需要根据仿真需要选择是否进行设置。而运动设置用来解决含二维机械运动的场分析，端口设置和外电路设置在寄生参数提取和场路耦合问题仿真分析中进行设置。物理特性设置完毕后，进行求解器设置，以选取求解器的类型和使用的求解方法。求解器设置完毕后进行求解，最后在求解结束后设置后处理显示选项，对感兴趣的求解结果进行查看。如果结果满足仿真需求则到此结束，否则修改仿真流程中相应部分的参数并重新求解。

3. 软件启动及工程创建

3.1. 软件启动

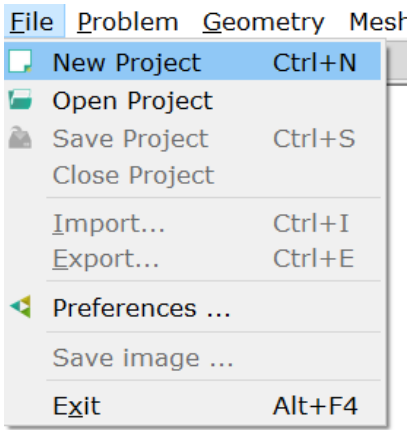
双击 EMPbridge.exe 可执行文件即可打开软件平台，或者可以在开始菜单搜索EMPbridge后打开，软件的欢迎界面如下图所示。初次运行默认没有显示相应的工程树和仿真信息提示窗口，可以在工具栏空白处右键，弹出下图所示菜单，将相应的浮动窗口进行勾选即可显示。



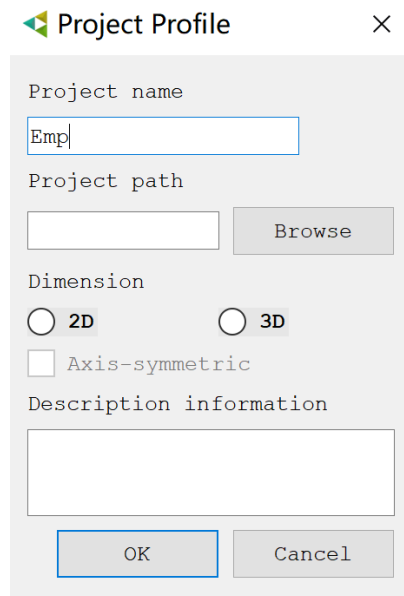
启动EMPbridge软件

3.2. 新建工程

通过点击菜单栏 File -> New Project 弹出新建工程窗口。在新建工程窗口中，在 Project name 项中填写工程名字；在 Project path 项中点击 Browse 按钮，弹出对话框选择工程文件的保存路径；在 Dimension 项中选择求解二维或三维问题；在 Description information 选项中给出工程信息的描述，作为备忘。点选2D选项后，可激活Axis-symmetric复选框，勾选后在轴对称模式下进行分析。



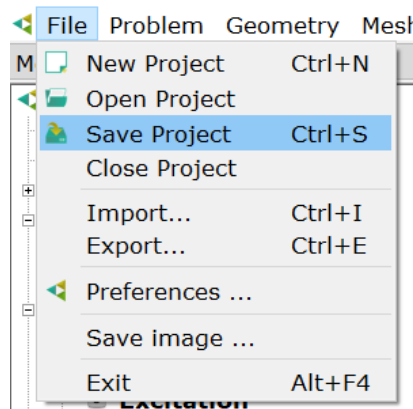
菜单栏 File -> New Project 新建工程



新建工程的设置窗口

3.3. 保存工程

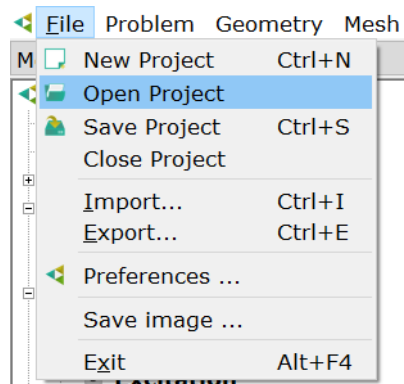
通过点击菜单栏 File -> Save Project 对工程文件进行保存。



保存工程

3.4. 打开工程

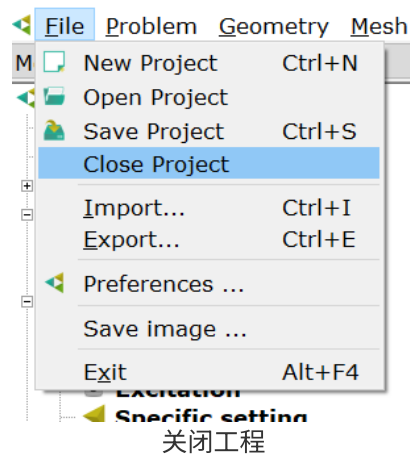
通过点击菜单栏 File -> Open Project 打开后缀为 ".emp" 的 EMPbridge 工程文件。



打开工程

3.5. 关闭工程

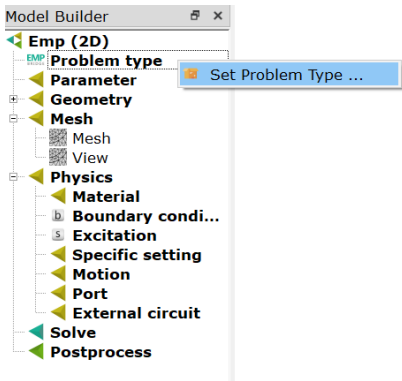
通过点击菜单栏 File -> Close Project 关闭工程文件。1.26版本暂时只支持单个工程文件的编辑，即需要关闭当前工程后，才能新建一个新的工程。



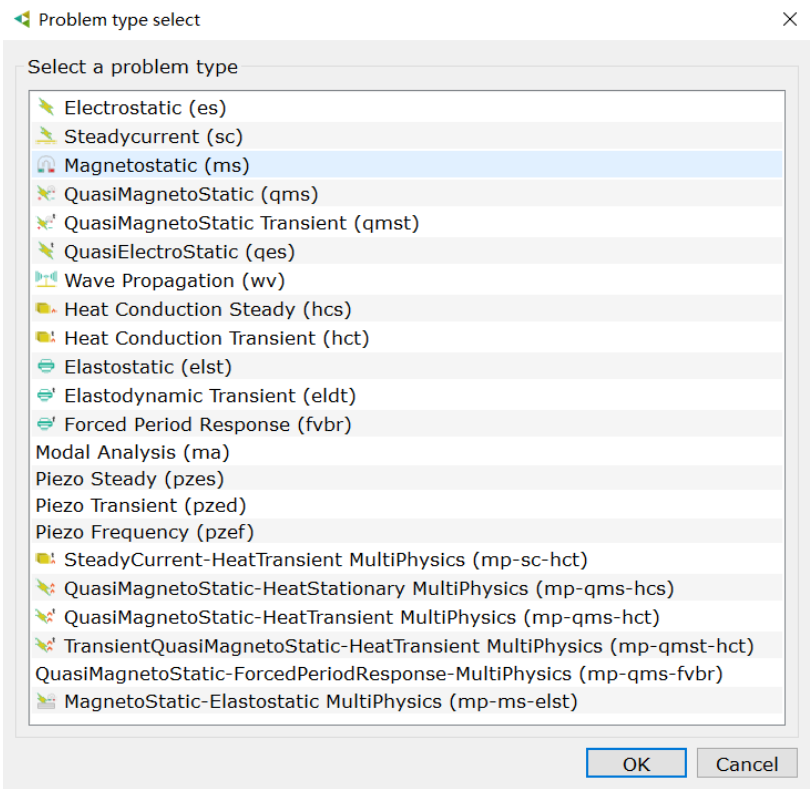
4. 问题类型设置 (Problem type)

4.1. 二维问题类型设置

如果在3.2节新建工程时选择仿真二维问题，则在设置问题类型时自动筛选出二维问题所对应的物理场求解类型列表。右键工程树上 Problem Type 节点弹出 Set Problem Type 选项，单击打开二维问题设置列表，在列表选取仿真所需的物理场分析类型进行仿真，关于二维单物理场和二维多物理耦合场分析的说明请见4.1.1节和4.1.2节。

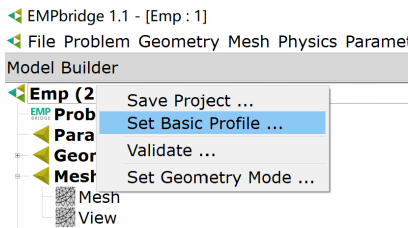


工程树上 Problem Type 节点右键弹出问题类型设置选项

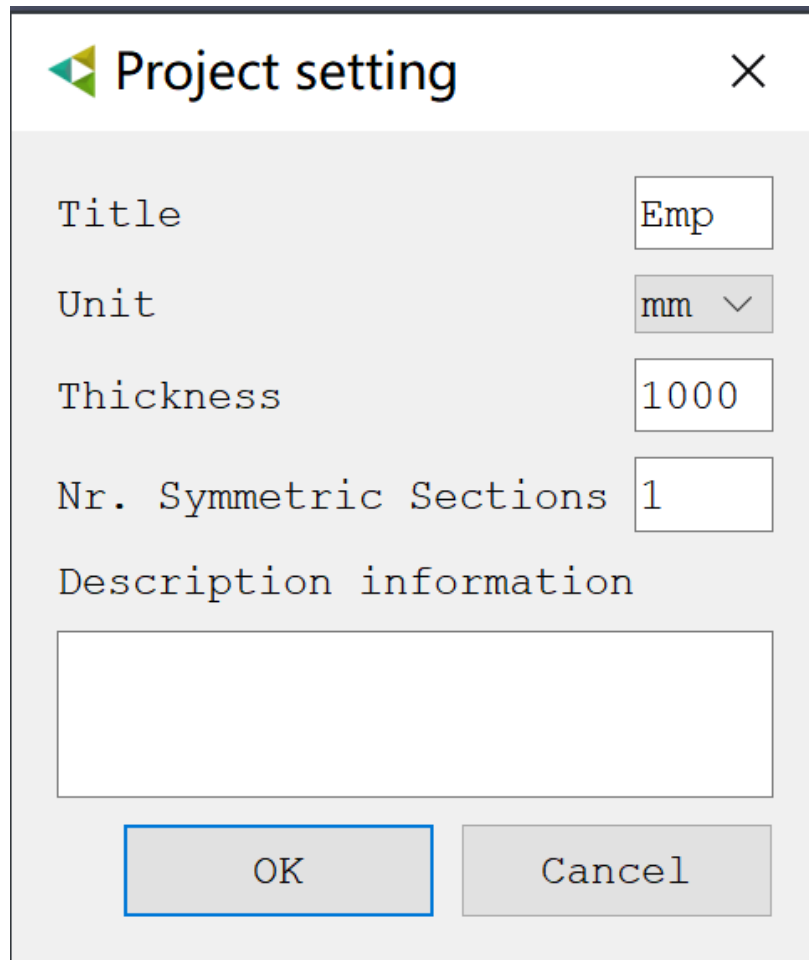


平台支持的二维物理场分析类型

对于二维问题，可以通过右击工程名称，选择Set Basic Profile对计算的单位，模型的厚度和周期结构的区间数进行设置：



工程树上问题根节点右键弹出基本属性设置选项

A screenshot of a 'Project setting' dialog box. The dialog has a title bar with a green and yellow icon and a close button. It contains several input fields: 'Title' with the value 'Emp', 'Unit' with a dropdown menu showing 'mm', 'Thickness' with the value '1000', and 'Nr. Symmetric Sections' with the value '1'. Below these is a section labeled 'Description information' with a large empty text area. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Project setting

Title Emp

Unit mm

Thickness 1000

Nr. Symmetric Sections 1

Description information

OK Cancel

基本属性设置对话框

关于二维问题类型的说明如下：

- 问题类型名称后括号内为其缩写，以“mp”开头的缩写为多物理耦合问题；
- 1.26 版本中列表中的部分问题暂不支持（主要包括高频场以及个别多物理耦合分析），在选择时会弹出提示；

4.1.1. 二维单物理场分析说明

4.1.1.1. 静电场分析 (2D Electrostatic [es])

静电场分析的控制方程，支持的边界、激励以及后处理的说明如下：

1. 控制方程

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

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

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位是 V/m ； $\mathbf{D}$ 是电通量密度，单位是 C/m^2 ； ρ 是电荷密度，单位是 C/m^3 ； ϵ 是介电常数，单位是 F/m ；

2. 支持的边界条件：

- 电势边界 (ElectricPotential)：用户可以输入电势的数值或表达式

- $$v = v_0 \text{ on } \Gamma$$

- 浮导体边界 (Floating)：导体等电位
- 主从边界条件 (Master_Slave)

- $$\begin{aligned} \text{周期边界 (Periodic)} : V|_{\text{master}} &= V|_{\text{slave}} \\ \text{半周期边界 (Semi - Periodic)} : V|_{\text{master}} &= -V|_{\text{slave}} \end{aligned}$$

3. 支持的激励

- 表面电荷 (SurfaceCharge)：用户给定表面电荷 Q_s 的大小

- $$\begin{aligned} -\epsilon \frac{\partial v}{\partial \mathbf{n}} &= \rho_s \\ \rho_s &= Q_s / S \end{aligned}$$

- 表面电荷密度 (SurfaceChargeDensity)：用户给定表面电荷密度 ρ_s 的大小

- $$-\epsilon \frac{\partial v}{\partial \mathbf{n}} = \rho_s$$

- 空间电荷 (SpaceCharge)：用户给定空间电荷 Q_0 的大小，其中 V 为体积，单位是 m^3

- $$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \rho &= Q_0 / V \end{aligned}$$

- 空间电荷密度 (SpaceChargeDensity)：用户给定空间电荷密度 ρ_0 的大小

- $$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \rho &= \rho_0 \end{aligned}$$

4. 后处理

二维静电场分析支持以下场量的显示：

- 电势分布 (ElectricPotential)
- 电场强度矢量分布 (E_Field)

- 电通量密度矢量分布 (D_Field)
- 电场强度模值分布 (Mag_E)
- 电通量模值分布 (Mag_D)
- 显示节点电磁力的分布 (nodeForce)，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的几何区域

二维静电场分析支持以下的集总量计算：

- 区域电磁力的总和 (Force)，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- 区域能量总和 (energy)

4.1.1.2. 恒定电流场分析 (2D SteadyCurrent [sc])

二维的恒定电流场方程可参照[三端口连接器](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

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

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位是 V/m ； $\mathbf{J}$ 是电流密度，单位是 A/m^2 ； σ 是电导率，单位是 S/m ；

2. 支持的边界条件：

- 电势边界 (ElectricPotential)：用户可以输入电势的数值或表达式

- $$v = v_0 \text{ on } \Gamma$$

- 主从边界条件 (Master_Slave)

- 周期边界 (**Periodic**) : $V|_{master} = V|_{slave}$

半周期边界 (**Semi – Periodic**) : $V|_{master} = -V|_{slave}$

3. 支持的激励

恒定电流场暂不支持显式的激励选项，可以通过边界条件设置间接给定。

4. 支持的后处理

支持的场分布计算：

- 电势分布 (ElectricPotential)
- 电场强度矢量分布 (E_Field)
- 电场强度模值分布 (Mag_E)
- 电流密度模值分布 (Mag_J)
- 电流密度矢量分布 (J_Field)

支持的集总量计算：

- 区域能量总和 (energy)
- 区域涡流损耗的总和 (Total_OhmLoss)：用户需在后处理中定义计算损耗的区域

4.1.1.3. 静磁场分析 (2D Magnetostatic [ms])

二维静磁场可参照[永磁同步电机转动](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

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

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

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

其中， $\mathbf{H}$ 是磁场强度，单位是 A/m ； $\mathbf{J}$ 是电流密度，单位是 A/m^2 ； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度，单位是 Wb/m^2 ； μ 是磁导率，单位是 H/m 。

2. 支持的边界条件

- ZeroNormalMagneticInduction：磁场法向分量为零，其中 $\mathbf{A}$ 为矢量磁位

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- Master_Slave：主从边界条件

$$\text{周期边界 (Periodic)} : A|_{master} = A|_{slave}$$

$$\text{半周期边界 (Semi - Periodic)} : A|_{master} = -A|_{slave}$$

- ZeroTangentialMagneticInduction：磁场切向分量为零

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- MagneticPotential z：磁势

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0 \text{ on } \Gamma$$

3. 支持的激励

- ElectricCurrent_z：电流激励，用户可以输入电流 I_0 的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = I_0 / S$$

- ElectricCurrentDensity_z：电流密度激励，用户可以输入电流密度 J_0 的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = J_0$$

- PermanentMagnet：永磁体激励，用户需要关联永磁体的几何区域，并输入永磁体的充磁方向 $\mathbf{e}$

$$\mathbf{Br} = \|\mathbf{Br}\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

4. 支持的后处理

支持的场分布计算：

- A_Field：磁矢量位分布
- B_Field：磁感应强度矢量分布
- Mag_B：磁感应强度模值分布
- H_Field：磁场强度矢量分布
- Mag_H：磁场强度模值分布

- nodeForce: 显示节点电磁力的分布, 用户需在Specific setting中定义计算电磁力的区域
-

支持的集总量计算:

- Torque: 力矩, 用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- Current: port 中流入/流出的电流, 用户需定义 port 并关联几何区域
- InducedVoltage: 感应电动势
- Force: 区域电磁力的总和, 用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- energy: 区域能量总和
 - Core_Loss: 铁磁材料区域铁损计算, 目前支持采用Bertotti分离铁耗模型:

$$P = K_h f B + K_e f^2 B^2 + K_c f^{1.5} B^{1.5}$$

计算铁损, 用户需要输入磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗系数 K_h , K_e 和 K_c . 静磁场分析中仅在场路耦合情形下支持这一输出。

4.1.1.4. 频域准静磁场分析 (2D QuasiMagnetostatic [qms])

二维频域准静磁场可参照[TEAM problem 30a 感应电机](#)进行设置。场分析的控制方程, 支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下:

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega \mathbf{B} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{E}$ 是电场强度, 单位 V/m ; $\mathbf{H}$ 是磁场强度, 单位 A/m ; $\mathbf{J}$ 是电流密度, 单位 A/m^2 ; $\mathbf{B}$ 是磁感应强度, 单位 Wb/m^2 ; μ 是磁导率, 单位是 H/m ; σ 是电导率, 单位是 S/m 。

2. 支持的边界条件

- ZeroNormalMagneticInduction: 磁场法向分量为零, 其中 $\mathbf{A}$ 为矢量磁位

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- Master_Slave: 主从边界条件

$$\begin{aligned}\text{周期边界 (Periodic)} : A|_{master} &= A|_{slave} \\ \text{半周期边界 (Semi - Periodic)} : A|_{master} &= -A|_{slave}\end{aligned}$$

- ZeroTangentialMagneticInduction: 磁场切向分量为零

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- MagneticPotential z: 磁势边界

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0 \text{ on } \Gamma$$

3. 支持的激励

- ElectricCurrent_z: 电流激励, 用户可以输入电流 I_0 的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = I_0 / S$$

- ElectricCurrentDensity_z: 电流密度激励, 用户可以输入电流密度 J_0 的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = J_0$$

- PermanentMagnet: 永磁体激励, 用户需要关联永磁体的几何区域, 并输入永磁体的充磁方向 $\mathbf{e}$

$$\mathbf{Br} = \|\mathbf{Br}\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

4. 支持的后处理

支持的场分布计算:

- A_Field: 磁矢量位分布
- B_Field: 磁感应强度矢量分布
- Mag_B: 磁感应强度实部模值分布
- ComplexMag_B: 磁感应强度实部和虚部模值分布
- H_Field: 磁场强度矢量分布
- Mag_H: 磁场强度实部模值分布
- ComplexMag_H: 磁场强度实部和虚部模值分布
- Mag_J: 电流密度模值分布, 用户需在Specific setting中定义计算涡流的区域
- J_Field: 电流密度矢量场分布, 用户需在Specific setting中定义计算涡流的区域
- nodeForce: 节点电磁力的分布, 用户需在Specific setting中定义计算电磁力的区域

支持的集总量计算:

- Torque: 力矩, 用户需在Specific setting中定义计算力的区域
- Total_OhmLoss: 区域欧姆损耗的总和, 用户需在Specific setting中定义计算涡流的区域
- Force: 区域电磁力的总和, 用户需在Specific setting中定义计算电磁力的区域
- energy: 区域能量总和
 - Core_Loss: 铁磁材料区域铁损计算, 目前支持采用Bertotti分离铁耗模型:

$$P = K_h f \mathbf{B} + K_e f^2 \mathbf{B}^2 + K_c f^{1.5} \mathbf{B}^{1.5}$$

计算铁损, 用户需要输入磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗系数 K_h , K_e 和 K_c .

4.1.1.5. 时域准静磁场分析 (2D QuasiMagnetostatics Transient [qmst])

二维时域准静磁场可参照[TEAM problem 30a 感应电机](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \mu\mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma\mathbf{E}\end{aligned}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位 V/m ； $\mathbf{H}$ 是磁场强度，单位 A/m ； $\mathbf{J}$ 是外加电流密度，单位 A/m^2 ； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度，单位 Wb/m^2 ； μ 是磁导率，单位 H/m ； σ 是电导率，单位 S/m 。

2. 支持的边界条件

- ZeroNormalMagneticInduction：磁场法向分量为零,其中 $\mathbf{A}$ 为矢量磁位

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- Master_Slave：主从边界条件

$$\text{周期边界 (Periodic)} : A|_{\text{master}} = A|_{\text{slave}}$$

$$\text{半周期边界 (Semi - Periodic)} : A|_{\text{master}} = -A|_{\text{slave}}$$

3. 支持的激励

- ElectricCurrent_z：电流激励，用户可以输入电流 I_0 的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = I_0/S$$

- ElectricCurrentDensity_z：电流密度激励，用户可以输入电流密度 J_0 的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = J_0$$

- PermanentMagnet：永磁体激励，用户需要关联永磁体的几何区域，并输入永磁体的充磁方向 $\mathbf{e}$

$$\mathbf{Br} = \|\mathbf{Br}\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

4. 初始值

二维时域准静磁场分析支持初始值的设定：

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{c} \text{ on } \Gamma$$

5. 支持的后处理

支持以下场量的显示：

- A_Field：磁矢量位分布
- B_Field：磁感应强度矢量分布
- Mag_B：磁感应强度模值分布

- H_Field：磁场强度矢量分布
- Mag_H：磁场强度模值分布
- Mag_J：电流密度模值分布，用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- J_Field：电流密度矢量场分布，用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- nodeForce：节点电磁力的分布，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域

支持的集总量计算：

- Torque：力矩，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- Total OhmLoss：区域欧姆损耗的总和，用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- Force：区域电磁力的总和，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- energy：区域能量总和
- Core_Loss: 铁磁材料区域铁损计算，目前支持采用Bertotti分离铁耗模型：

$$P = K_h f \mathbf{B} + K_e f^2 \mathbf{B}^2 + K_c f^{1.5} \mathbf{B}^{1.5}$$

计算铁损，用户需要输入磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗系数 K_h , K_e 和 K_c 。

4.1.1.6 频域准静态电场分析（2D QuasiElectroStatic [qes]）

二维准静态电场的控制方程、边界条件、激励和后处理支持的场量输入说明如下：

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位 V/m ； $\mathbf{D}$ 是电场位移矢量，单位 C/m^2 ； $\mathbf{H}$ 是磁场强度，单位 A/m ； $\mathbf{J}$ 是电流密度，单位 A/m^2 ； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度，单位 Wb/m^2 。

2. 本构关系

$$\begin{aligned}\mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

其中， μ 是磁导率，单位是 H/m ； ϵ 是介电常数，单位是 F/m ； σ 是电导率，单位是 S/m 。

3. 支持的边界条件

- 电势边界（ElectricPotential）：用户输入电势的数值或表达式

$$\circ \quad v = v_0 \text{ on } \Gamma$$

4. 后处理

支持以下场量的显示：

- 电势分布（ElectricPotential）

- 电场强度矢量分布 (E_Field)
- 电通量密度矢量分布 (D_Field)
- 电场强度实部模值分布 (Mag_E)
- 电场强度复数模值分布 (ComplexMag_E)
- 电通量实部模值分布 (Mag_D)
- 电通量复数模值分布 (ComplexMag_D)

- 显示节点电磁力的分布 (nodeForce)，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的几何区域

支持以下的集总量计算：

- 区域电磁力的总和 (Force)，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- 区域能量总和 (energy)

4.1.1.7. 稳态热场分析 (2D Heat Conduction Steady [hcs])

二维稳态热场的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{q} &= \overline{Q} \\ \mathbf{q} &= -\lambda \nabla T\end{aligned}$$

其中 T 是温度，单位是 K ； $\overline{Q}(x, y)$ 是空间内热源，单位是 W/m^3 ； $\mathbf{q}$ 是热通量，单位是 W/m^2 ； λ 是热传导系数，单位是 $W/(m \cdot K)$ 。

2. 支持的边界条件：

- 恒定温度的边界条件(TemperatureDirichlet)：用户可以输入温度 T_0 的数值

- $$T = T_0 \text{ on } \Gamma$$

- 热流边界条件 (ConvectiveHeatFlux)：某个边界上的热流

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T_s - T_f)$$

其中， T_s 是外界温度， T_f 是研究对象的温度， h 是对流系数。

- 辐射边界条件(HeatRadiation):

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \epsilon_1 \sigma (T_1 - T_2)$$

其中， T_1 是辐射源温度， T_2 是研究对象的温度， ϵ_1 是辐射系数， σ 是玻尔兹曼常数。

-

3. 支持的激励

- 体热源 (HeatSource)：

- $$\nabla \cdot \mathbf{q} = \overline{Q}$$

其中 $\overline{Q}$ 是加在体上面的热源。

- 表面热源 (HeatFlux_Surface)

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \bar{q}$$

- 其中 $\bar{q}$ 是加在体上面的热源。

4.后处理

二维瞬态热场分析支持以下场量的显示：

- Temp[K]：温度分布

4.1.1.8. 瞬态热场分析 (2D Heat Conduction Transient [hct])

二维瞬态热场的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$q = -\lambda \nabla T$$

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = \bar{Q}$$

其中 T 是温度，单位是 K ； t 是时间，单位是 s ； $\bar{Q}(x, y)$ 是空间内热源，单位是 W/m^3 ； $\mathbf{q}$ 是热通量，单位是 W/m^2 ； λ 是热传导系数，单位是 $W/(m \cdot K)$ ； ρ 是密度，单位是 kg/m^3 ； C_p 是热容，单位是 $J/(kg \cdot K)$ 。

2.支持的边界条件：

- 恒定温度的边界条件(TemperatureDirichlet)：用户可以输入温度 T_0 的数值

- $$T = T_0 \text{ on } \Gamma$$

- 热流边界条件 (ConvectiveHeatFlux)：某个边界上的热流

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T_s - T_f)$$

其中， T_s 是外界温度， T_f 是研究对象的温度， h 是对流系数。

- 辐射边界条件(HeatRadiation):

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \epsilon_1 \sigma (T_1 - T_2)$$

其中， T_1 是辐射源温度， T_2 是研究对象的温度， ϵ_1 是辐射系数， σ 是玻尔兹曼常数。

3.支持的激励

- 体热源 (HeatSource)：

- $$\nabla \cdot \mathbf{q} = \bar{Q}$$

其中 $\bar{Q}$ 是加在体上面的热源。

- 表面热源 (HeatFlux_Surface)

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \bar{q}$$

- 其中 $\bar{q}$ 是加在体上面的热源。

4. 初始值

二维瞬态热场分析支持初始值的设定，设置初始时刻研究对象的温度。

5. 后处理

二维瞬态热场分析支持以下场量的显示：

- Temp[K]：温度分布
- Parameter Name: 支持选择变化的参数（如：时间的变化）
- Value (From-To)：选择参数变化的范围

4.1.1.9. 静力学分析 (2D Elastostatic [elst])

静力学平衡微分方程为：

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{f}_v = \mathbf{0}$$

其中， σ 是应力张量，单位 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ ， $\mathbf{f}_v$ 是体积力，单位 N/m^3 。

二维力学分析分为平面应力和平面应变问题。在工程树上 Problem type -> Elastostatic -> Elastostatic 节点右键选择 Config formulation 可以切换 PlaneStress 和 planeStrain。

- 平面应力问题：

适用于薄板状结构，且材料、受力、位移变形在厚度方向（ z 方向）均匀一致， z 方向的应力分量为零或可以忽略。

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} &= 0, \\ \epsilon_{zz} &= -\frac{\nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{E}, \epsilon_{yz} = \epsilon_{xz} = 0 \end{aligned}$$

其中 σ 是应力张量， ϵ 是应变张量， E 是杨式模量， ν 是泊松比。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yx} \end{bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ 2\epsilon_{yx} \end{bmatrix}$$

- 平面应变问题：

$$\begin{aligned} \epsilon_{zz} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{xz} &= 0, \\ \sigma_{zz} &= \frac{E\nu(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0 \end{aligned}$$

适用于材料、受力、位移变形在厚度方向（ z 方向）均匀一致， z 方向的位移被约束的结构，其 z 方向的应变分量为零或可以忽略。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} (1 - \nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1 - \nu) & 0 \\ 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ 2\epsilon_{yx} \end{bmatrix}$$

- 支持的边界条件：
 - 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{l} &= u_l \\ u_l &= (u_x, u_y) \end{aligned}$$

- 支持的荷载类型：

- 面荷载 (Boundary force)

$$F_A = (f_x, f_y)$$

- 体荷载 (Body force)

$$F_V = (f_x, f_y)$$

- 支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 $\mathbf{u}$
- von_Mises_Stress: von Mises 应力场

4.1.1.10. 瞬态动力学分析 (2D Elastodynamic Transient [eldt])

动力学微分方程为：

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{f}_v = \rho \ddot{\mathbf{u}} + \mu \dot{\mathbf{u}}$$

其中 σ 是应力张量， $\mathbf{f}_v$ 是体积力， ρ 是材料密度， μ 是阻尼系数。

有限元平衡方程：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{M}$ 是质量矩阵， $\mathbf{C}$ 是阻尼矩阵， $\mathbf{K}$ 是刚度矩阵， $\mathbf{u}$ 是结点位移向量， $\mathbf{f}$ 是荷载列向量。

- 支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{l} &= u_l \\ u_l &= (u_x, u_y) \end{aligned}$$

- 支持的荷载类型：

- 面荷载 (Boundary force)

$$F_A = (f_x(t), f_y(t))$$

- 体荷载 (Body force)

$$F_V = (f_x(t), f_y(t))$$

4.1.1.11. 受迫振动分析 (2D Forced Period Response [fvbr])

如果动力学方程中的外力可以完成如下形式，

$$\mathbf{f} = \bar{\mathbf{f}} \exp(\alpha t)$$

其中 $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$ 是复数，则动力学方程的通解也可以写成相似的形式

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \exp(\alpha t).$$

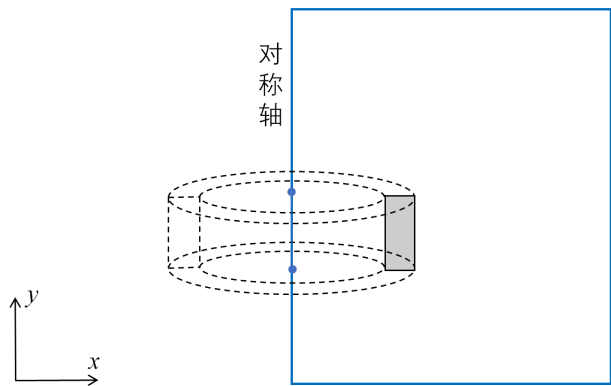
将上式代入有限元平衡方程有

$$(\alpha^2\mathbf{M} + \alpha\mathbf{C} + \mathbf{K})\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{f}}$$

上述方程的解代表系统在周期外力下最终建立起来的与初始状态无关的稳态响应。

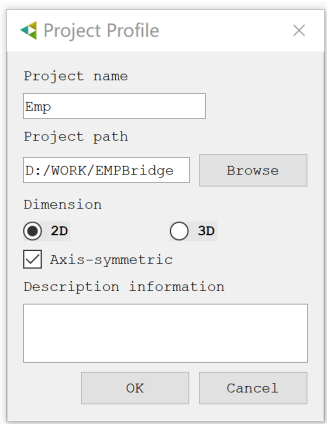
4.1.2 轴对称问题分析说明

支持通过二维轴对称方法进行静电场、静磁场、涡流场计算，其电场或磁场需要在该点绕对称轴360°的区域内具有相同的分布，默认y轴为对称轴，计算结果为结果在二维截面区域内的电场或磁场分布：



轴对称问题分析示意图

计算轴对称问题需要在新建工程时选择2D后，继续选择Axis-symmetric：

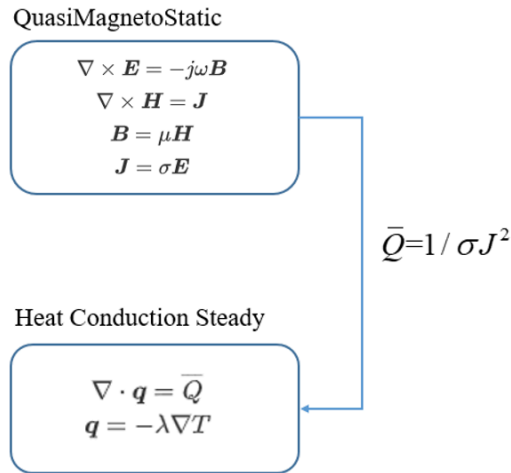


轴对称问题分析示意图

4.1.3 二维多物理场耦合分析说明

4.1.3.1. 频域准静磁场-稳态热场分析 (2D QuasiMagnetostatic-HeatStationary Multiphysics [mp-qms-hcs])

支持通过频域准静磁场和稳态热场耦合计算，分析涡流产生的焦耳热作为热源产生的温度分布。在设置频域准静磁场时，需要在 Specific setting 中设置计算涡流的区域，涡流损耗将作为热源传递到稳态热场中。在V1.0中， 频域准静磁场和稳态热场耦合方式为单向弱耦合。



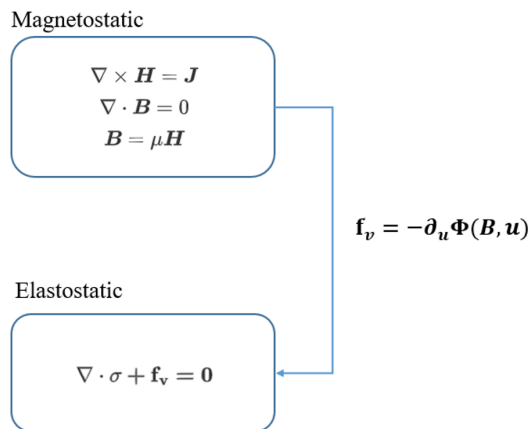
频域涡流场-稳态热场耦合分析示意图

4.1.3.2. 静磁场-弹性静力耦合分析 (2D MagnetoStatic-Elastostatic Multiphysics [mp-ms-elst])

支持通过静磁和结构静力耦合计算，分析电磁力对结构受力和形变的影响。

在问题类型列表中选择MagnetoStatic-Elastostatic Multiphysics (mp-ms-elst)。

在建模过程中，需要在 Specific setting 中设置计算力学的区域，磁场力作为稳态力场计算中的源。在V1.0中，静磁场和稳态力场耦合方式为单向弱耦合。

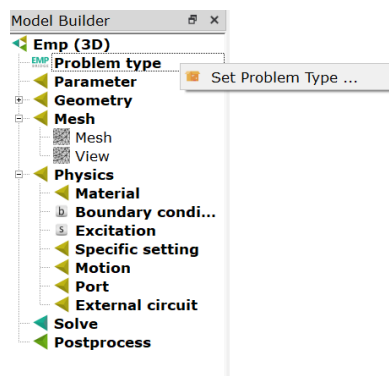


静磁-稳态力学耦合分析示意图

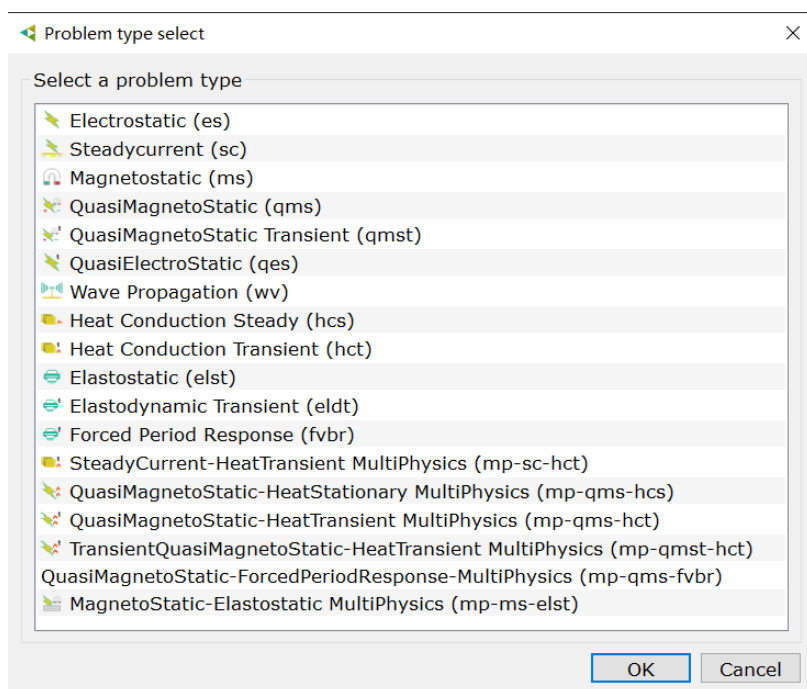
其中 Φ 是磁场能量， $\mathbf{u}$ 是虚位移。在静磁场中通过虚功原理求得磁场能量，对磁场能量求梯度得到磁场力。用静磁模块计算得到的磁场力作为稳态力学模块中的源，计算相应的结构变化。

4.2. 三维问题类型设置

如果在[3.2节](#)新建工程时选择仿真三维问题，则在设置问题类型时自动筛选出三维问题所对应的物理场求解类型列表。右键工程树上 Problem Type 节点弹出 Set Problem Type 选项，单击打开三维问题设置列表，在列表中选择仿真所需的物理场分析类型进行仿真，关于三维单物理场和三维多物理耦合场分析的说明请见[4.2.1节](#)和[4.2.2节](#)。



工程树上 Problem Type 节点右键弹出问题类型设置选项



平台支持的三维物理场分析类型

关于三维问题类型的说明如下：

- 问题类型名称后括号内为其缩写，以“mp”开头的缩写为多物理耦合问题；
- 1.26 版本中列表中的部分问题暂不支持（主要包括准静电场、高频场以及个别多物理耦合分析），在选择时会弹出提示；

4.2.1. 三维单物理场分析说明

4.2.1.1. 静电场分析 (3D Electrostatic [es])

三维的静电场方程可参照[集成电路参数提取](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

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

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位是 V/m ； $\mathbf{D}$ 是电通量密度，单位是 C/m^2 ； ρ 是电荷密度，单位是 C/m^3 ； ϵ 是介电常数，单位是 F/m ；

2. 支持的边界条件：

- 电势边界 (ElectricPotential)：用户可以输入电势的数值或表达式

- $$v = v_0 \text{ on } \Gamma$$

- 浮导体边界 (Floating)：导体等电位
- 开放边界 (OpenBoundary)：用于边界元计算，1.26 版本暂不支持

3. 支持的激励

- 表面电荷 (SurfaceCharge)：用户给定表面电荷 Q_s 的大小

- $$-\epsilon \frac{\partial v}{\partial \mathbf{n}} = \rho_s$$
$$\rho_s = Q_s / S$$

- 表面电荷密度 (SurfaceChargeDensity)：用户给定表面电荷密度 ρ_s 的大小

- $$-\epsilon \frac{\partial v}{\partial \mathbf{n}} = \rho_s$$

- 空间电荷 (SpaceCharge)：用户给定空间电荷 Q_0 的大小，其中 V 为体积，单位是 m^3

- $$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
$$\rho = Q_0 / V$$

- 空间电荷密度 (SpaceChargeDensity)：用户给定空间电荷密度 ρ_0 的大小

- $$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$
$$\rho = \rho_0$$

4. 后处理

三维静电场分析支持以下场量的显示：

- 电势分布 (ElectricPotential)
- 电场强度矢量分布 (E_Field)
- 电通量密度矢量分布 (D_Field)
- 电场强度模值分布 (Mag_E)

- 电通量模值分布 (Mag_D)
- 显示节点力的分布 (nodeForce)，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域，1.26 版本暂不支持

三维静电场分析支持以下的集总量计算：

- 电容矩阵 (Inductance Table)：用户需要在 port 中定义提取电容的端口，并关联几何区域或者从边界条件中继承已设置的边界条件
- 一阶敏感度矩阵 (Sensitivity 1st Table)：用户需要在问题类型右键增加敏感度分析，并关联几何区域
- 区域力的总和 (Force)，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域，1.1 版本暂不支持
- 区域能量总和 (energy)

4.2.1.2. 恒定电流场分析 (3D SteadyCurrent [sc])

三维场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{J} &= 0 \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位是 V/m ； $\mathbf{J}$ 是电流密度，单位是 A/m^2 ； σ 是电导率，单位是 S/m ；

2. 支持的边界条件：

- 电势边界 (ElectricPotential)：用户可以输入电势的数值或表达式
- $$v = v_0 \text{ on } \Gamma$$

3. 支持的激励

恒定电流场暂不支持显式的激励选项，可以通过边界条件设置间接给定。

4. 支持的后处理

支持的场分布计算：

- 电势分布 (ElectricPotential)
- 电场强度矢量分布 (E_Field)
- 电场强度模值分布 (Mag_E)
- 电流密度模值分布 (Mag_J)
- 电流密度矢量分布 (J_Field)

支持的集总量计算：

- 区域能量总和 (energy)
- 区域涡流损耗的总和 (Total_OhmLoss)：用户需在后处理中定义计算损耗的区域

4.2.1.3. 静磁场分析 (3D Magnetostatic [ms])

三维静磁场的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

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

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

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

其中， $\mathbf{H}$ 是磁场强度，单位是 A/m ； $\mathbf{J}$ 是电流密度，单位是 A/m^2 ； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度，单位是 Wb/m^2 ； μ 是磁导率，单位是 H/m 。

2. 支持的边界条件

- ZeroNormalMagneticInduction：磁场法向分量为零，其中 $\mathbf{A}$ 为矢量磁位

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- ZeroTangentialMagneticInduction：磁场切向分量为零

$$\text{Primal} : \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- OpenBoundary：用于边界元计算，1.26 版本暂不支持

3. 支持的激励

- ElectricCurrent：电流激励，用户可以输入电流的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = J_0$$

- ElectricCurrentDensity：电流密度激励，用户可以输入电流密度的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = I_0/S$$

- PermanentMagnet：永磁体激励，用户需要关联永磁体的几何区域，并输入永磁体的充磁方向

$$\mathbf{B}r = \|\mathbf{B}r\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

- MagneticFluxDensity：磁感应强度激励

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{n}$$

4. 支持的后处理

支持以下场量的显示：

- Mag_B：磁感应强度模值分布
- B_Field：磁感应强度矢量分布
- H_Field：磁场强度矢量分布
- Mag_H：磁场强度模值分布
- nodeForce：显示节点力的分布，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域

支持以下的集总量计算：

- Inductance Table：电感矩阵，用户需要在 port 中定义提取电感的端口，并关联几何区域或者从激励中继承已设置的电流激励
- Force：区域力的总和，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域
- energy：区域能量总和

4.2.1.4. 频域准静磁场分析 (3D QuasiMagnetostatic [qms])

三维频域准静磁场可参照[TEAM problem 7 带孔铝板感应涡流](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B}$$

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

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位 V/m ； $\mathbf{H}$ 是磁场强度，单位 A/m ； $\mathbf{J}$ 是电流密度，单位 A/m^2 ； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度，单位 Wb/m^2 ； μ 是磁导率，单位是 H/m ； σ 是电导率，单位是 S/m 。

2. 支持的边界条件

- ZeroNormalMagneticInduction：磁场法向分量为零，其中 $\mathbf{A}$ 为矢量磁位

$$\text{Primal} : n \times \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- ZeroTangentialMagneticInduction：磁场切向分量为零

$$\text{Primal} : n \cdot \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

- OpenBoundary：用于边界元计算，1.26 版本暂不支持

3. 支持的激励

- ElectricCurrent：电流激励，用户可以输入电流的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = j_0$$

- ElectricCurrentDensity：电流密度激励，用户可以输入电流密度的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = I_0/S$$

- PermanentMagnet：永磁体激励，用户需要关联永磁体的几何区域，并输入永磁体的充磁方向

$$\mathbf{Br} = \|\mathbf{Br}\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

- MagneticFluxDensity：磁感应强度激励

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = B_0 \cdot \mathbf{n}$$

4. 支持的后处理

支持以下场量的显示：

- Mag_B：磁感应强度模值分布
- B_Field：磁感应强度矢量分布
- ComplexMag_B：磁感应强度实部和虚部模值分布
- H_Field：磁场强度矢量分布
- Mag_H：磁场强度模值分布
- ComplexMag_H：磁场强度实部和虚部模值分布

- Mag_J：电流密度模值分布，用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- J_Field：电流密度矢量场分布，用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- nodeForce：显示节点力的分布，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域

支持以下的集总量计算：

- Resistance Inductance Table：电阻电感矩阵
- Torque：力矩，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域
- Total_OhmLoss：区域欧姆损耗的总和，用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- Force：区域力的总和，用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域
- energy：区域能量总和
- Core_Loss: 铁磁材料区域铁损计算，目前支持采用Bertotti分离铁耗模型：

$$P = K_h f \mathbf{B} + K_e f^2 \mathbf{B}^2 + K_c f^{1.5} \mathbf{B}^{1.5}$$

计算铁损，用户需要输入磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗系数 K_h , K_e 和 K_c 。

4.2.1.5. 时域准静磁场分析 (3D QuasiMagnetostatics Transient [qmst])

三维时域准静磁场可参照 [TEAM problem 7 铝板瞬时发热](#) 进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

其中， $\mathbf{E}$ 是电场强度，单位 V/m ； $\mathbf{H}$ 是磁场强度，单位 A/m ； $\mathbf{J}$ 是外加电流密度，单位 A/m^2 ； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度，单位 Wb/m^2 ； μ 是磁导率，单位 H/m ； σ 是电导率，单位 S/m 。

2. 支持的边界条件

- ZeroNormalMagneticInduction：磁场法向分量为零，其中 $\mathbf{A}$ 为矢量磁位

$$\text{Primal} : n \times \mathbf{A} = 0 \text{ on } \Gamma$$

3. 支持的激励

- ElectricCurrent：电流激励，用户可以输入电流的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = j_0$$

- ElectricCurrentDensity：电流密度激励，用户可以输入电流密度的数值或表达式

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = I_0/S$$

- PermanentMagnet：永磁体激励，用户需要关联永磁体的几何区域，并输入永磁体的充磁方向

$$\mathbf{Br} = \|\mathbf{Br}\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

- MagneticFluxDensity: 磁感应强度激励

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{n}$$

4. 支持的后处理

支持以下场量的显示:

- Mag_B: 磁感应强度模值分布
- B_Field: 磁感应强度矢量分布
- Complex Mag_B: 磁感应强度实部和虚部模值分布
- H_Field: 磁场强度矢量分布
- Mag_H: 磁场强度模值分布
- Complex Mag_H: 磁场强度实部和虚部模值分布
- Mag_J: 电流密度模值分布, 用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- J_Field: 电流密度矢量场分布, 用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- nodeForce: 显示节点力的分布, 用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域

支持以下的集总量计算:

- Torque: 力矩, 用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域
- Total_Ohm-loss: 区域欧姆损耗的总和, 用户需在 Specific setting 中定义计算涡流的区域
- Force: 区域力的总和, 用户需在 Specific setting 中定义计算力的区域
- energy: 区域能量总和
- Core_Loss: 铁磁材料区域铁损计算, 目前支持采用Bertotti分离铁耗模型:

$$P = K_h f \mathbf{B} + K_e f^2 \mathbf{B}^2 + K_c f^{1.5} \mathbf{B}^{1.5}$$

计算铁损, 用户需要输入磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗系数 K_h , K_e 和 K_c .

4.2.1.6 频域准静态电场分析 (3D QuasiElectroStatic [qes])

三维准静态电场的控制方程、边界条件、激励和后处理支持的场量输入说明如下:

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{E}$ 是电场强度, 单位 V/m ; $\mathbf{D}$ 是电场位移矢量, 单位 C/m^2 ; $\mathbf{H}$ 是磁场强度, 单位 A/m ; $\mathbf{J}$ 是电流密度, 单位 A/m^2 ; $\mathbf{B}$ 是磁感应强度, 单位 Wb/m^2 。

2. 本构关系

$$\begin{aligned}\mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

其中， μ 是磁导率，单位是 H/m ； ϵ 是介电常数，单位是 F/m ； σ 是电导率，单位是 S/m 。

3. 支持的边界条件

- 电势边界 (ElectricPotential)：用户输入电势的数值或表达式

- $$v = v_0 \text{ on } \Gamma$$

4. 后处理

支持以下场量的显示：

- 电势分布 (ElectricPotential)
 - 电场强度矢量分布 (E_Field)
 - 电通量密度矢量分布 (D_Field)
 - 电场强度实部模值分布 (Mag_E)
 - 电场强度复数模值分布 (ComplexMag_E)
 - 电通量实部模值分布 (Mag_D)
 - 电通量复数模值分布 (ComplexMag_D)
- 显示节点电磁力的分布 (nodeForce)，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的几何区域

支持以下的集总量计算：

- 区域电磁力的总和 (Force)，用户需在 Specific setting 中定义计算电磁力的区域
- 区域能量总和 (energy)

4.2.1.7. 稳态热场分析 (3D Heat Conduction Steady [hcs])

三维时域准静磁场可参照[金属板的发热](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{q} &= \overline{Q} \\ \mathbf{q} &= -\lambda \nabla T\end{aligned}$$

其中 T 是温度，单位是 K ； $\overline{Q}(x, y)$ 是空间内热源，单位是 W/m^3 ； $\mathbf{q}$ 是热通量，单位是 W/m^2 ； λ 是热传导系数，单位是 $W/(m \cdot K)$ 。

2. 支持的边界条件：

- 恒定温度的边界条件(TemperatureDirichlet)：用户可以输入温度的数值

- $$T = T_0 \text{ on } \Gamma$$

- 热流边界条件 (ConvectiveHeatFlux)：某个边界上的热流

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T_s - T_f)$$

其中， T_s 是外界温度， T_f 是研究对象的温度， h 是对流系数。

- 辐射边界条件(HeatRadiation):

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \epsilon_1 \sigma (T_1 - T_2)$$

其中, T_1 是辐射源温度, T_2 是研究对象的温度, ϵ_1 是辐射系数, σ 是玻尔兹曼常数。

3.支持的激励

- 体热源 (HeatSource):

- $$\nabla \cdot \mathbf{q} = \overline{Q}$$

其中 $\overline{Q}$ 是加在体上面的热源。

- 表面热源 (HeatFlux_Surface)

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \overline{q}$$

- 其中 $\overline{q}$ 是加在体上面的热源。

4.后处理

二维瞬态热场分析支持以下场量的显示:

- Temp[K]: 温度分布

4.2.1.8. 瞬态热场分析 (3D Heat Conduction Transient [hct])

三维瞬态热场可参照[金属板的发热](#)进行设置。场分析的控制方程, 支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下:

1. 控制方程

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T = \overline{Q}$$

其中 T 是温度, 单位是 K ; t 是时间, 单位是 s ; $\overline{Q}(x, y)$ 是空间内热源, 单位是 W/m^3 ; $\mathbf{q}$ 是热通量, 单位是 W/m^2 ; λ 是热传导系数, 单位是 $W/(m \cdot K)$; ρ 是密度, 单位是 kg/m^3 ; C_p 是热容, 单位是 $J/(kg \cdot K)$ 。

2.支持的边界条件:

- 恒定温度的边界条件(TemperatureDirichlet): 用户可以输入温度的数值

- $$T = T_0 \text{ on } \Gamma$$

- 热流边界条件 (ConvectiveHeatFlux): 某个边界上的热流

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T_s - T_f)$$

其中, T_s 是外界温度, T_f 是研究对象的温度, h 是对流系数。

- 辐射边界条件(HeatRadiation):

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \epsilon_1 \sigma (T_1 - T_2)$$

其中, T_1 是辐射源温度, T_2 是研究对象的温度, ϵ_1 是辐射系数, σ 是玻尔兹曼常数。

3.支持的激励

- 体热源 (HeatSource):

- $$\nabla \cdot \mathbf{q} = \overline{Q}$$

其中 $\overline{Q}$ 是加在体上面的热源。

- 表面热源 (HeatFlux_Surface)

- $$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \overline{q}$$

- 其中 $\overline{q}$ 是加在体上面的热源。

4. 初始值

三维瞬态热场分析支持初始值的设定，设置研究对象的初始温度。

5. 后处理

三维瞬态热场分析支持以下场量的显示：

- Temp[K]: 温度分布
- Parameter Name: 支持对时间、角度的瞬态变化
- Value (From-To): 可以选择后处理的变化范围

4.2.1.9. 静力学分析 (3D Elastostatic [elst])

三维静力学分析可参照[linkrod受力](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{f}_v = \mathbf{0}$$

其中， σ 是应力张量，单位 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ ， $\mathbf{f}_v$ 是体积力，单位 N/m^3 。

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

对于一般的线性弹性材料，应力应变关系为：

$$\sigma = \mathbb{C} \epsilon$$

其中 $\mathbb{C}$ 是弹性关系4阶张量，单位 Pa ， ϵ 是应变张量，无量纲。对于小变形情况，应变与位移场 $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z)$ 的关系为：

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla)$$

由于对称性，应力、应变可以等价于以下列向量

$$\mathbf{s} \doteq \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}, \mathbf{e} \doteq \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{xz} \\ 2\epsilon_{xy} \end{Bmatrix}$$

线性弹性关系可以表示为

$$\mathbf{s} = \mathbf{D}\mathbf{e}$$

其中 $\mathbf{D}$ 是 6×6 的材料本构矩阵。对于各向同性材料

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix}$$

其中 E 是杨式模量，单位Pa， ν 是泊松比，无量纲， $-1 < \nu < 0.5$ 。

最终方程求解的未知数是位移场 $\mathbf{u}$ 。

2.支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{l} = u_l$$

$$u_l = (u_x, u_y, u_z)$$

3.支持的荷载类型：

- 面载荷 (Boundary force)

$$\mathbf{F}_A = (f_x, f_y, f_z)$$

- 体载荷 (Body force)

$$\mathbf{F}_V = (f_x, f_y, f_z)$$

4.支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 $\mathbf{u}$
- von_Mises_Stress: von Mises 应力场

4.2.1.10. 瞬态动力学分析 (3D Elastodynamic Transient [eldt])

1. 控制方程

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_v = \rho \ddot{\mathbf{u}} + \mu \dot{\mathbf{u}}$$

其中， $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力张量，单位 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ ， $\mathbf{f}_v$ 是体积力，单位 N/m^3 ， ρ 是材料密度， μ 是阻尼系数

2. 支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{l} = u_l$$

$$u_l = (u_x, u_y, u_z)$$

3. 支持的荷载类型：

- 面荷载 (Boundary force)

$$F_A = (f_x, f_y, f_z)$$

- 体荷载 (Body force)

$$F_V = (f_x, f_y, f_z)$$

4. 支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 $\mathbf{u}$
- von_Mises_Stress: von Mises 应力场

4.2.1.11. 受迫振动分析 (3D Forced Period Response [fvbr])

如果动力学方程中的外力可以完成如下形式，

$$\mathbf{f} = \bar{\mathbf{f}} \exp(\alpha t)$$

其中 $\alpha = \alpha_1 + i\alpha_2$ 是复数，则动力学方程的通解也可以写成相似的形式

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \exp(\alpha t).$$

将上式代入有限元平衡方程有

$$(\alpha^2 \mathbf{M} + \alpha \mathbf{C} + \mathbf{K}) \bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{f}}$$

上述方程的解代表系统在周期外力下最终建立起来的与初始状态无关的稳态响应。

4.2.1.12. 稳态压电分析 (3D PiezoElectric Steady [pzes])

三维稳态压电分析，场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1. 控制方程

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \cdot \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{S} - \epsilon^S \cdot \mathbf{E}$$

其中，T是应力，S是应变，E是电场，D是电通量；e是压电耦合系数矩阵， $\mathbf{c}^E$ 是特定电场强度下的弹性矩阵， ϵ^S 是特定应力下的介电矩阵。

用变分原理和有限元离散化方法，不考虑阻尼项，建立压电耦合有限元矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} M_u & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ q \end{bmatrix}$$

其中u是位移， ϕ 是电势， M_u 是质量矩阵， K_{uu} 是刚度矩阵， $K_{u\phi}$ 是压电耦合矩阵， $K_{\phi\phi}$ 是介电导率 (dielectric conductivity)。f是结构载荷向量，q是电载荷向量。应变、电场分别和位移、电位有如下关系：

$$S = B_u \cdot u$$

$$E = B_\phi \cdot \phi$$

用单元结点位移和形函数表示应变有：

$$[S^e] = [B_u]\{u^e\}$$

B_u 为包含形函数微分的矩阵：

$$[B_u] = \begin{bmatrix} [N_x] & 0 & 0 \\ 0 & [N_y] & 0 \\ 0 & 0 & [N_z] \\ 0 & [N_z] & [N_y] \\ [N_z] & 0 & [N_x] \\ [N_y] & [N_x] & 0 \end{bmatrix}$$

同样对于每个单元，用节点电势和形函数表示电场：

$$[E^e] = -[B_\phi]\{\phi^e\}$$

B_ϕ 为包含形函数微分的矩阵，忽略有限元矩阵方程中时间的二阶微分项，为稳态压电分析。

2.支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$u_l = (u_x, u_y, u_z)$$

3.支持的荷载类型：

- 面载荷 (Boundary force)

$$F_A = (f_x, f_y, f_z)$$

4.支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 **u**

4.2.1.13. 频域压电分析 (3D PiezoElectric Steady [pzes])

三维频域压电分析，场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1.同4.2.1.10（受迫振动分析）

2.支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$u_l = (u_x, u_y, u_z)$$

3.支持的荷载类型：

- 面载荷 (Boundary force)

$$F_A = (f_x, f_y, f_z)$$

4.支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 **u**

4.2.1.14. 瞬态压电分析 (3D PiezoElectric Transient [pzet])

三维瞬态压电分析，场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1.控制方程

$$\begin{aligned}\mathbf{T} &= \mathbf{c}^E \cdot \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \mathbf{e} \cdot \mathbf{S} - \epsilon^S \cdot \mathbf{E}\end{aligned}$$

用变分原理和有限元离散化方法，不考虑阻尼项，建立压电耦合有限元矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} M_u & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ q \end{bmatrix}$$

此方程为瞬态压电分析的有限元方程。

2.支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$u_l = (u_x, u_y, u_z)$$

3.支持的荷载类型：

- 面载荷 (Boundary force)

$$F_A = (f_x, f_y, f_z)$$

4.支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 $\mathbf{u}$

4.2.1.15. 模态分析 (3D Modal Analysis[ma])

三维模态分析，场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明如下：

1.有限元平衡方程

$$(\alpha^2 \mathbf{M} + \alpha \mathbf{C} + \mathbf{K}) \bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{f}}$$

模态计算时没有外部载荷，进行特征值和特征向量的求解来得到特征频率和与之对应的模态。

2.支持的边界条件：

- 位移边界条件 (Elastic_DisplacementConstraint)

$$u_l = (u_x, u_y, u_z)$$

3.支持的场量输出：

- Displacement_Field: 位移场 $\mathbf{u}$

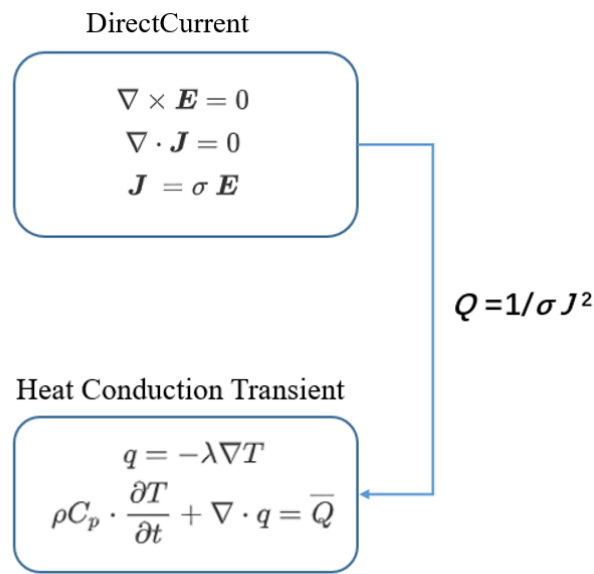
4.2.2. 三维多物理场耦合分析说明

4.2.2.1. 恒定电流-瞬态热场分析 (3D SteadyCurrent-HeatTransient Multiphysics [mp-sc-hct])

1.26版本中支持三维恒定电流-瞬态热场的多时间尺度顺序耦合分析，可考虑焦耳热的温升效应，以及温度变化对材料属性（电导率）的影响，可参照案例:[IGBT封装的发热](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明请分别参考[恒定电流场](#)和[瞬态热场](#)分析。

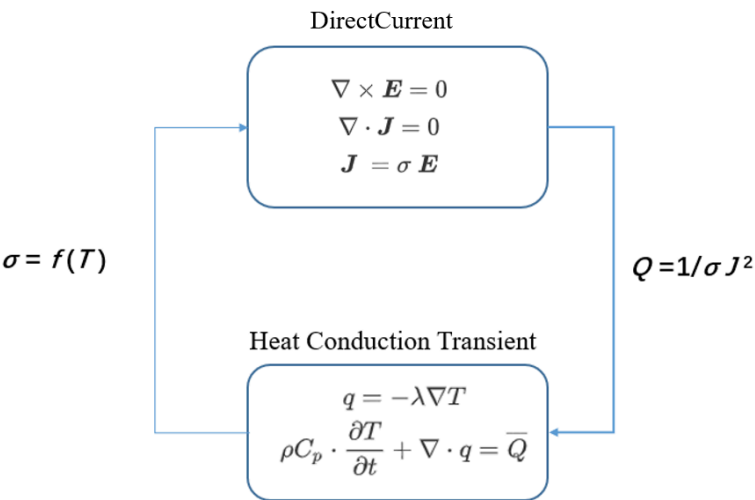
根据材料参数是否与温度相关，将恒定电流-瞬态热场的耦合关系分为单向耦合和双向耦合，如下图所示。在双向耦合中，电导率参数可以设置为温度相关的表达式。

- 单向耦合



恒定电流-瞬态热场单向耦合

- 双向耦合

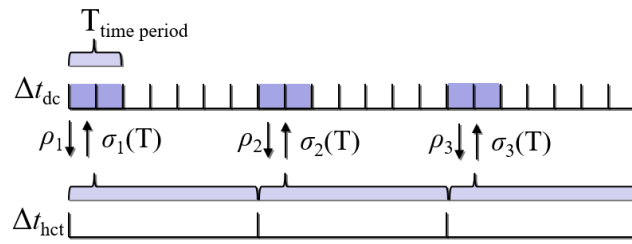


恒定电流-瞬态热场双向耦合

在恒定电流-瞬态热耦合计算中，可分别设置恒定电流和瞬态热的时间步长（目前1.26版本只支持定步长）。同时，求解器根据用户输入的边界条件电势，自动判断其是周期信号（如果电势为恒定值，则其周期为恒定电流的时间步长）或者非周期信号，并根据不同类型输入进行下面两种模式的耦合分析：

1. 恒定电流-瞬态热多时间尺度耦合

在恒定电流场中可以通过边界条件设置时变的电势，当时变电势为一个周期信号（或者稳定值），并且瞬态热的步长远大于时变电势的周期，则物理场被设定为一个多时间尺度的问题，如下图所示的恒定电流-瞬态热场时序及参数传递关系，此时瞬态热的热源为恒定电流场中时变周期内热损耗的平均值。



恒定电流-瞬态热场时序及参数传递关系（多时间尺度）

- 单向耦合

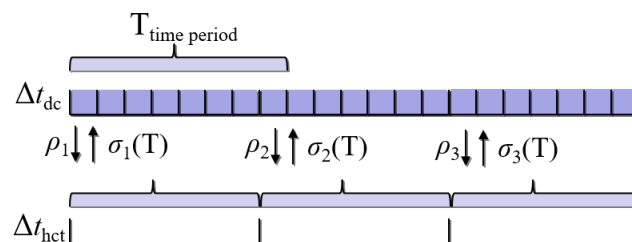
当用户定义的材料中，电导率（ σ ）为常数，求解器将进行单向耦合求解。此时恒定电流场仅进行一个信号周期内（ $T_{timeperiod}$ ）的场求解，但每个时间步的值将输出到后处理。

- 双向耦合

当用户定义的材料中，电导率（ σ ）依赖于温度（ T ）的表达式，求解器将进行双向耦合求解。此时恒定电流场在每一个瞬态热时间步（ Δt_{hct} ）内基于此时温度（ T ）更新电导率（ σ ），并且进行一个信号周期内（ $T_{timeperiod}$ ）的场求解。同时，对于每一个瞬态热时间步（ Δt_{hct} ），热源（ ρ ）将随着恒定电流场的计算而更新。

2. 恒定电流-瞬态热顺序耦合

在恒定电流场中设置边界条件的电势为非周期信号，或者是一个周期信号但是时变电势的周期与瞬态热的步长接近，则物理场被设定为顺序耦合求解，如下图所示的恒定电流-瞬态热场时序及参数传递关系，此时瞬态热的热源为恒定电流场中瞬态热时间步（ Δt_{hct} ）内热损耗的平均值。



- 单向耦合

当用户定义的材料中，电导率（ σ ）为常数，求解器将进行单向耦合求解。此时恒定电流场进行每一个恒定电流时间步（ Δt_{sc} ）的场求解，恒定电流场所得损耗在一个瞬态热时间步内进行累加取平均。对于每一个瞬态热时间步，热源（ ρ ）将随着恒定电流场的计算而更新。

- 双向耦合

当用户定义的材料中，电导率（ σ ）依赖于温度（T）的表达式，求解器将进行双向耦合求解。此时恒定电流场在每一个瞬态热时间步（ Δt_{hct} ）内基于此时温度（T）更新电导率（ σ ），并且进行每一个恒定电流时间步（ Δt_{sc} ）的场求解，恒定电流场所得损耗在一个瞬态热时间步内进行累加取平均。同时，对于每一个瞬态热时间步，热源（ ρ ）将随着恒定电流场的计算而更新。

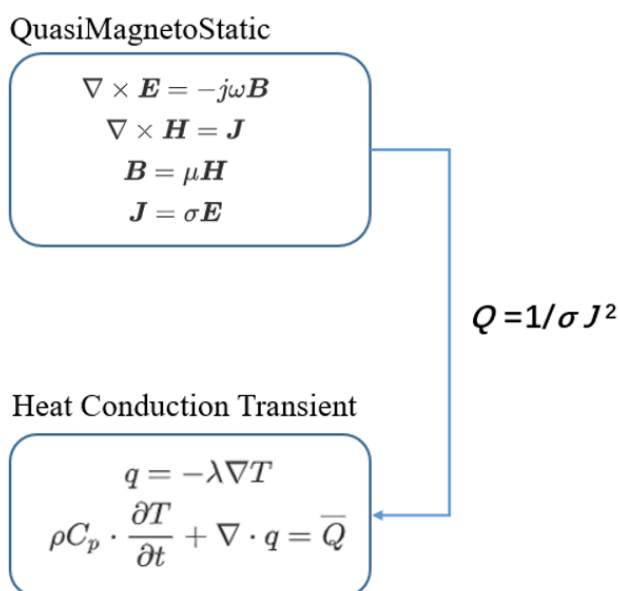
4.2.2.2. 频域准静磁场-瞬态热场分析 (3D QuasiMagnetostatic-HeatTransient Multiphysics [mp-qms-hct])

场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明请分别参考[频域准静磁场](#)和[瞬态热场](#)。

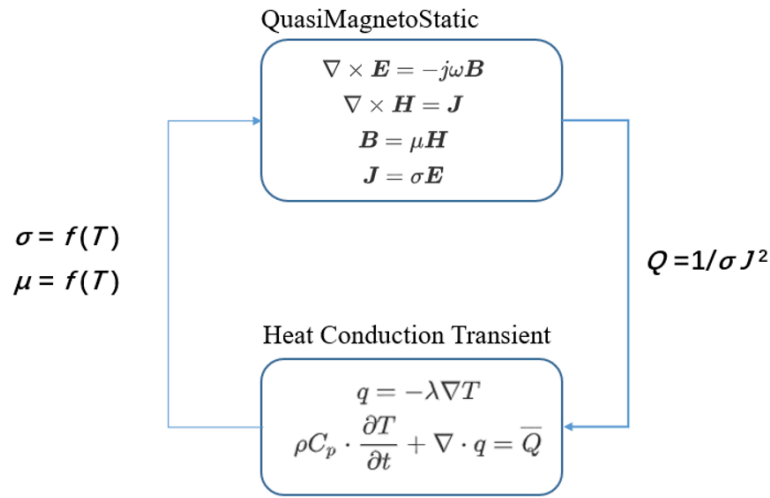
支持通过频域准静磁场和稳态热场耦合计算，分析涡流产生的焦耳热作为热源产生的瞬态温度分布。在设置频域准静磁场时，需要在 Specific setting 中设置计算涡流的区域，涡流损耗将作为热源传递到瞬态热场中。

根据材料参数是否与温度相关，将频域准静磁场-瞬态热场的耦合关系分为单向耦合和双向耦合，如下图所示。在双向耦合中，电导率和相对磁导率参数可以设置为温度相关的表达式。

- 单向耦合



- 双向耦合



频域准静磁场-瞬态热场双向耦合

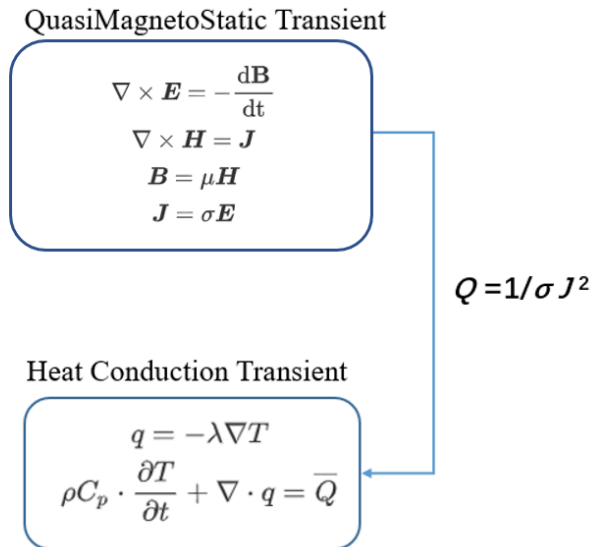
4.2.2.3. 时域准静磁场-瞬态热场分析 (3D QuasiMagnetostatic Transient-HeatTransient Multiphysics [mp-qmst-hct])

三维频域涡流-瞬态热场可参照[TEAM problem 7 铝板瞬时发热](#)进行设置。场分析的控制方程，支持的边界条件和激励以及后处理支持说明请分别参考[时域准静磁场](#)和[瞬态热场](#)。

支持通过频域准静磁场和稳态热场耦合计算，分析涡流产生的焦耳热作为热源产生的瞬态温度分布。在设置频域准静磁场时，需要在 Specific setting 中设置计算涡流的区域，涡流损耗将作为热源传递到瞬态热场中。

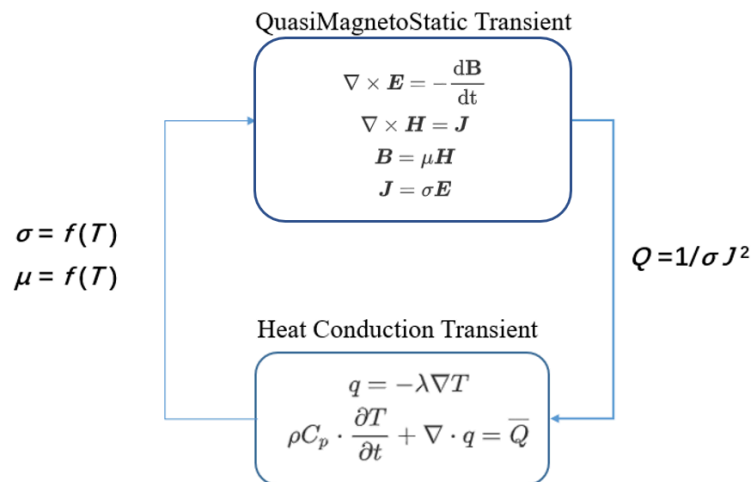
根据材料参数是否与温度相关，将时域准静磁场-瞬态热场的耦合关系分为单向耦合和双向耦合，如下图所示。在双向耦合中，电导率和相对磁导率参数可以设置为温度相关的表达式。

- 单向耦合



时域准静磁场-瞬态热场单向耦合

- 双向耦合

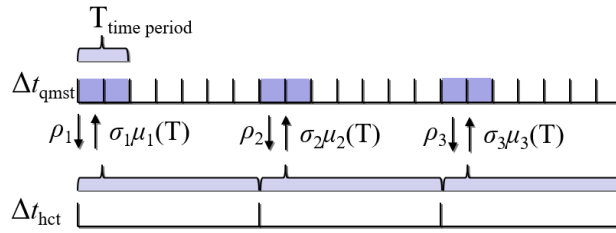


时域准静磁场-瞬态热场双向耦合

在时域准静磁场-瞬态热耦合计算中，需要分别设置时域准静磁场和瞬态热的时间步长（目前1.26版本只支持定步长）。同时，求解器根据用户输入的电流激励，判断其是周期信号（如果电流为恒定值，则其周期为时域准静磁场的时间步长）或者非周期信号。

1. 时域准静磁场-瞬态热多时间尺度耦合

在时域准静磁场中可以通过边界条件设置时变的电流，当时变电流为一个周期信号（或者稳定值），并且瞬态热的步长远大于时变电流的周期，则物理场被设定为一个多时间尺度的问题，如下图所示的时域准静磁场-瞬态热场时序及参数传递关系，此时瞬态热的热源为时域准静磁场中时变周期内热损耗的平均值。



时域准静磁场-瞬态热场时序及参数传递关系（多时间尺度）

- 单向耦合

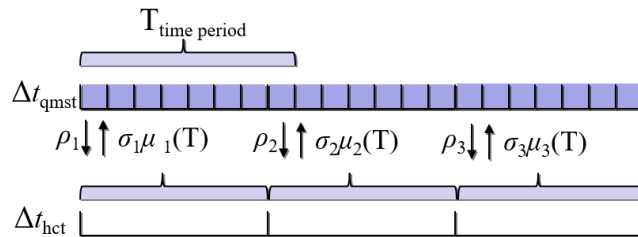
当用户定义的材料中，电导率（ σ ）为常数，求解器将进行单向耦合求解。此时时域准静磁场仅进行一个信号周期内（ $T_{timeperiod}$ ）的场求解，但每个时间步的值将输出到后处理。

- 双向耦合

当用户定义的材料中，电导率（ σ ）依赖于温度（ T ）的表达式，求解器将进行双向耦合求解。此时时域准静磁场在每一个瞬态热时间步（ Δt_{hct} ）内基于此时温度（ T ）更新电导率（ σ ），并且进行一个信号周期内（ $T_{timeperiod}$ ）的场求解。同时，对于每一个瞬态热时间步（ Δt_{hct} ），热源（ ρ ）将随着时域准静磁场的计算而更新。

2. 时域准静磁场-瞬态热顺序耦合

在时域准静磁场中设置边界条件的电势为非周期信号，或者是一个周期信号但是时变电势的周期与瞬态热的步长接近，则物理场被设定为顺序耦合求解，如下图所示的时域准静磁场-瞬态热场时序及参数传递关系，此时瞬态热的热源为时域准静磁场中瞬态热时间步（ δt_{hct} ）内热损耗的平均值。



时域准静磁场-瞬态热场时序及参数传递关系（顺序耦合）

- 单向耦合

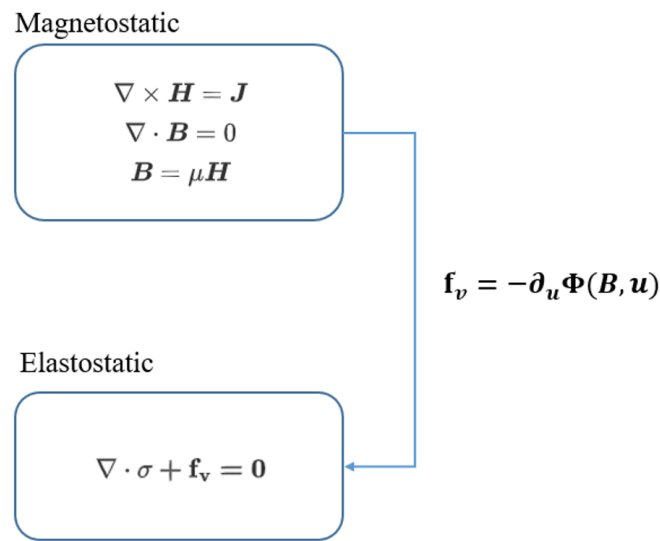
当用户定义的材料中，电导率（ σ ）为常数，求解器将进行单向耦合求解。此时时域准静磁场进行每一个时域准静磁场时间步（ Δt_{sc} ）的场求解，时域准静磁场所得损耗在一个瞬态热时间步内进行累加取平均。对于每一个瞬态热时间步，热源（ ρ ）将随着时域准静磁场的计算而更新。

- 双向耦合

当用户定义的材料中，电导率（ σ ）依赖于温度（ T ）的表达式，求解器将进行双向耦合求解。此时时域准静磁场在每一个瞬态热时间步（ Δt_{hct} ）内基于此时温度（ T ）更新电导率（ σ ），并且进行每一个时域准静磁场时间步（ Δt_{sc} ）的场求解，时域准静磁场所得损耗在一个瞬态热时间步内进行累加取平均。同时，对于每一个瞬态热时间步，热源（ ρ ）将随着时域准静磁场的计算而更新。

4.2.2.4. 静磁场-弹性静力分析 (3D MagnetoStatic-Elastostatic Multiphysics [mp-ms-elst])

支持通过静磁和结构静力耦合计算，分析电磁力对结构受力和形变的影响。在建模过程中，需要在 Specific setting 中设置计算力学的区域，磁场力作为稳态力场计算中的源。在V1.0中， 静磁场和稳态力场耦合方式为单向弱耦合。



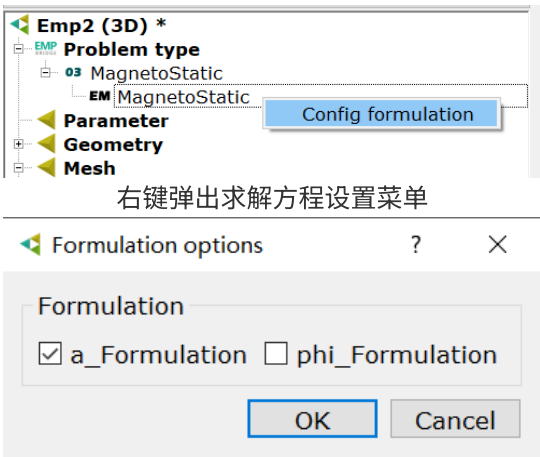
静磁-稳态力学耦合分析示意图

其中 Φ 是磁场能量， $\boldsymbol{u}$ 是虚位移。在静磁场中通过虚功原理求得磁场能量，对磁场能量求梯度得到磁场力。用静磁模块计算得到的磁场力作为稳态力学模块中的源，计算相应的结构变化。

在问题类型列表中选择MagnetoStatic-Elastostatic Multiphysics (mp-ms-elst)。

4.3. 对偶方法选择

右键问题类型中的物理场名字，选择 Config Formulation 可以选择使用的方程。以静磁场分析为例，右键弹出Config formulation选项，点击后在弹窗中选择希望使用的方程。1.26版暂且只支持三维静磁场和三维涡流场的对偶方法选择。



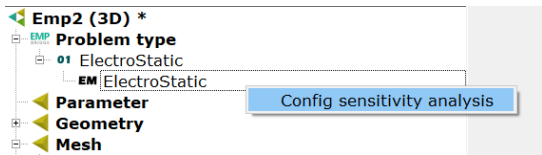
弹窗选择求解方程

4.4. 敏感度分析设置

1. 26版本仅支持三维静电场的敏感度设置。

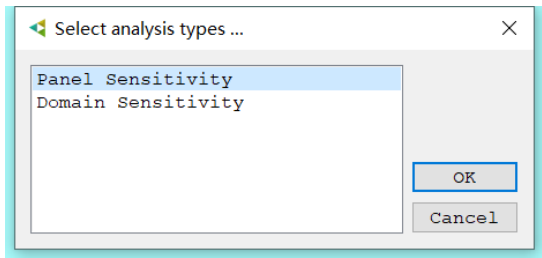
敏感度分析以电容提取端口（Port）为基础，因此用户需要在求解前设置Port。

右键ElectroStatic->Config sensitivity analysis，进入敏感度分析模式；



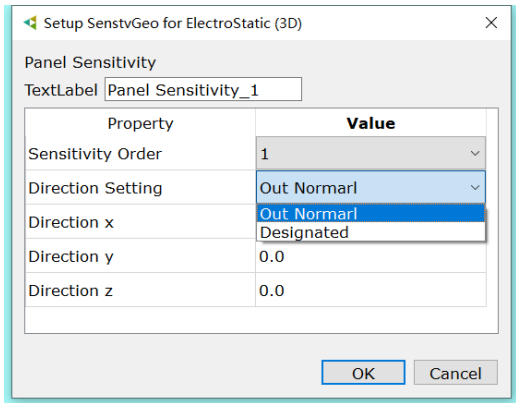
敏感度分析设置

右键Sensitivity analysis->add，选择关于面敏感度分析（panel sensitivity） 或者关于体敏感度分析（ domain sensitivity）；



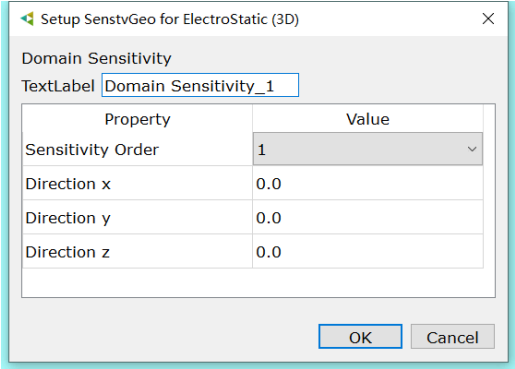
敏感度分析几何对象选择

- 关于面敏感度分析（panel sensitivity）
panel sensitivity中可以有两种方式，选择所在面的外法向（outer normal），或者输入指定的方向，不能为零。敏感度阶数（sensitivity order）在1.26版本中仅支持一阶。



关于面敏感度分析设置

- 关于体敏感度分析（ domain sensitivity）
domain sensitivity必须输入一个指定的方向，不能为零。敏感度阶数（sensitivity order）在1.26版本中仅支持一阶。



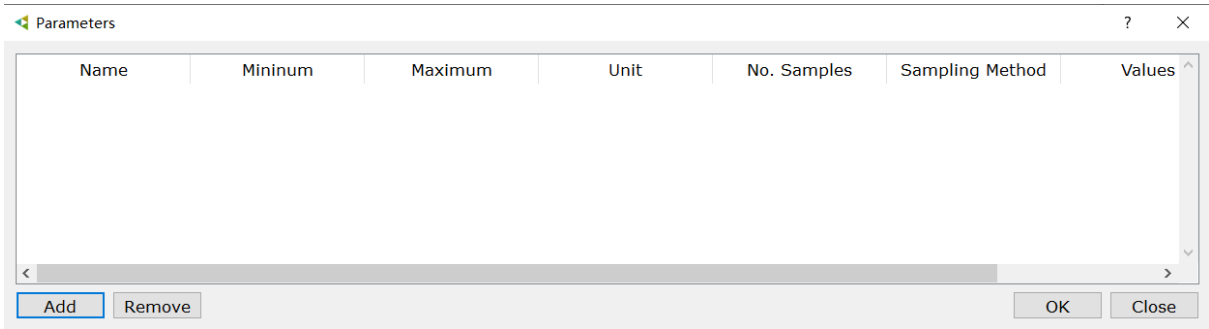
关于体敏感度分析设置

用户在增加敏感度分析节点后，需要关联几何区域。

5. 参数设置（Parameter）

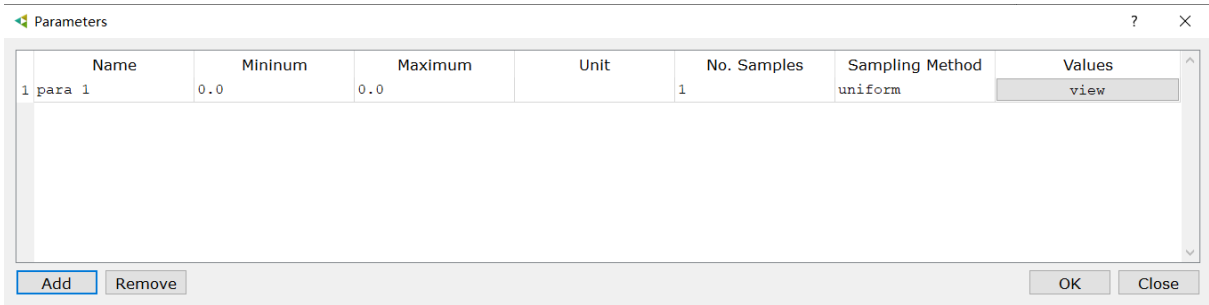
5.1. 参数设置界面

在模型树Parameters节点处右键点击“Set Parameters”弹出下图所示的参数设置界面。



参数设置界面

点击Add可以添加参数，在表格内设置参数的名称 (Name)，取值范围 (Minimum, Maximum)，单位 (Unit), 采样个数 (No. Samples), 采样方法 (Sampling Method)，并可以通过 view 按钮查看参数取值。



参数添加

在后续建模和计算中在支持参数输入的域中填写参数名称进行扫参分析。

5.2. 参数设置说明

- 1.26 版本中暂且仅支持单参数分析；
- 时间(time), 转角(angle)，位移(displacement)等涉及时间和运动的参数为系统内置参数，不能在参数模块进行添加，应在时域求解器和运动部分设置；
- 1.26 版本目前支持参数输入的域为频率和运动速度 (设置请参考案例[TEAM problem 30a 感应电机](#))，对其他部分的参数设置支持将在后续版本添加；

6. 几何建模设置 (Geometry)

在 Model Builder 窗口中，右键 Project 名称->Set Geometry Mode 中可以选择 Geometry Mode 或 Mesh Mode，默认为 Geometry Mode。几何模式需要在 Geometry Mode 下完成。

在 Model Builder 窗口中，点击 Geometry，会在上方工具栏中出现几何建模相关的各种按钮。

本章给出各种类型几何建模的入口及基本的建模方法。

6.1. 几何模型的导入与储存

6.1.1. 几何模型导入

新建工程后，通过 Geometry->Import CAD 可以导入在本平台建好的 brep 模型文件，也可以导入在商业软件中建好的 brep, igs, step 等格式的模型文件。导入模型后需要按照[节6.4.2](#)对导入的几何进行几何布尔操作，如果这些几何有内部交集或者有不完全重合的接触面，需要先按照[节6.4.2](#)对几何进行修改，再进行布尔操作。

6.1.2. 几何模型储存

在平台上建立好几何模型后，通过 Geometry->Export CAD 可以导出建好的几何模型，导出的几何模型可以在本平台或者其他商业软件中导入使用。

6.2. 草图绘制

点击 2D Geometry 图标，进入草图模式，使用 Sketch model 菜单中的选项建立基本模块，然后可以使用 Sketch constraints 菜单中的选项对基本模块进行一定的约束调整。



6.3 2D 几何建模

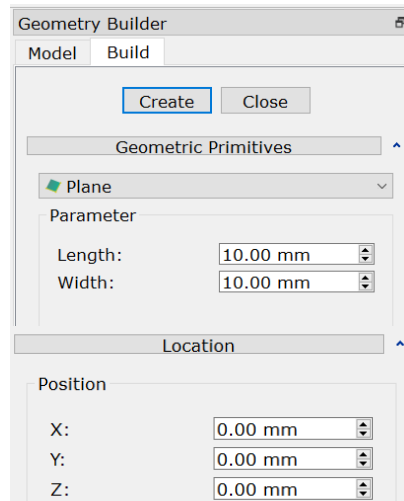
6.3.1 2D 几何模块

点击 Geometry Primitives 图标后，在 Geometry Builder 窗口的 Build 页面中，打开下拉菜单可以选择 2D Plane 进行创建。



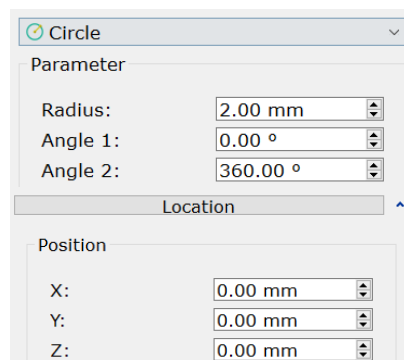
Geometry Primitives 图标

Plane 默认长宽均为 10mm，坐标值最小的一角放置在原点，可以在 Parameter 中修改它的大小，在 Location->Position 中修改它的位置。



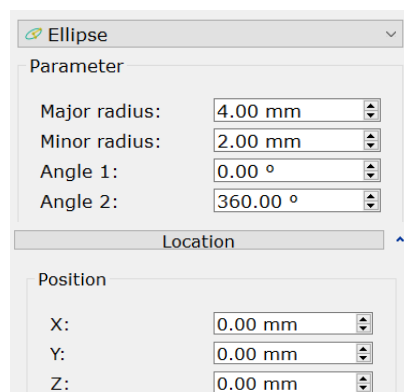
2D Plane 设置大小、位置

Circle 默认半径为 2mm，圆心放置在原点，可以在 Parameter 中修改它的半径和圆心角的大小，在 Location->Position 中修改它的位置。注意这样创建的 Circle 为一闭合线，需要在几何上或者在 Geometry Builder->Model->Geometry 中选中它后，点击上方 Geometry->Make face from wire，即可得到填充的 2D Circle。如果设置的圆心角不是 360°，那么只会产生一段圆弧，不是一条闭合曲线，此时无法使用 Geometry->Make face from wire 进行几何填充。



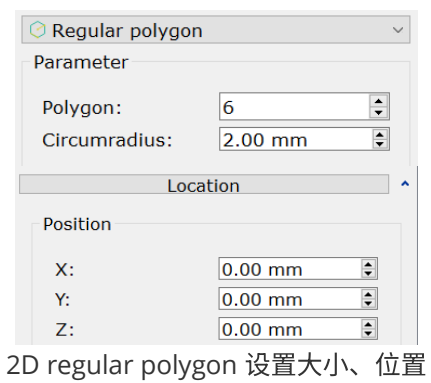
2D circle 设置大小、位置

Ellipse 默认半长轴为 4mm，半短轴为2mm，中心点为原点，可以在 Parameter 中修改它的半长轴、半短轴和圆心角的大小，在 Location->Position 中修改它的位置。这样创建的 Ellipse 为一条闭合线，需要在几何上或者在 Geometry Builder->Model->Geometry 中选中它后，点击上方 Geometry->Make face from wire，即可得到填充的 2D Ellipse。如果设置的圆心角不是360°，那么只会产生一段椭圆弧，不是一条闭合曲线，此时无法使用 Geometry->Make face from wire 进行几何填充。



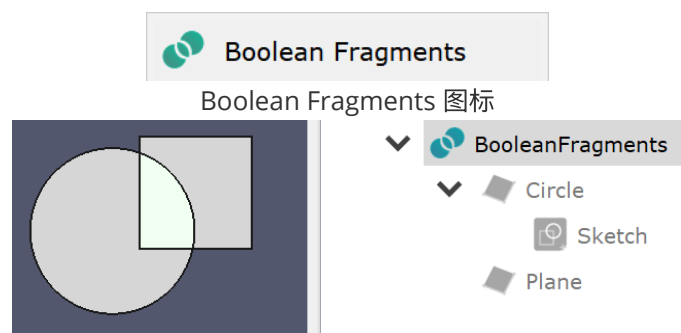
2D ellipse 设置大小、位置

Regular Polygen 默认边数为6，顶点到中心点距离为2mm，中心点位于原点，可以在 Parameter 中修改它的边数和顶点到中心点的距离，在 Location->Position 中修改它的位置。这样创建的 Regular Polygen 为一条线，需要在几何上或者在 Geometry Builder->Model->Geometry 中选中它后，点击上方 Geometry->Make face from wire，即可得到填充的 2D Regular Polygen。



6.3.2 2D 几何布尔操作

在建立一些2D几何模块后，选中这些模块，点击 Boolean Fragments 选项，对这些几何模块进行布尔操作，可以得到布尔并后的一个整体：



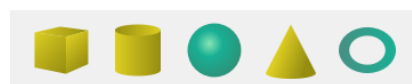
布尔并后得到整个几何，使布尔操作之前的两个几何形成交集、差集三个几何，可以分别选取几何建立完成后，需要点击Update按钮刷新几何信息后，才可以进行几何关联：



6.4. 3D 几何建模

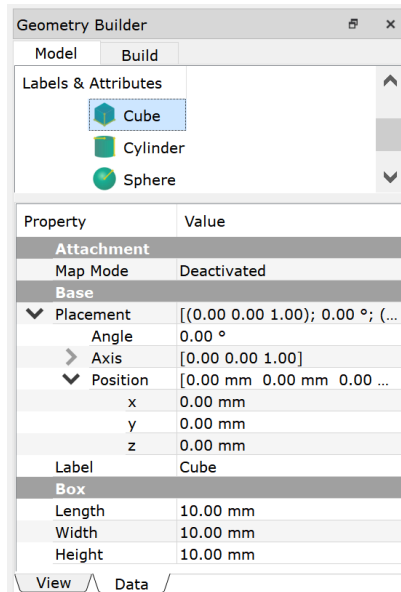
6.4.1. 3D 几何模块

EMPbridge 支持从 2D 草图进行建模后，通过 3D 扩展得到 3D 几何模型，也可以直接从 3D 几何模块开始进行建模。支持的 3D 几何模块包括 Cube, Cylinder, Sphere, Cone, Torus。



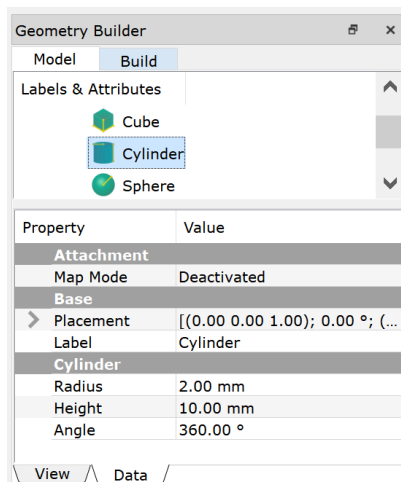
3D 几何模块，从左至右分别为 Cube, Cylider, Sphere, Cone, Torus

Cube 默认长宽高均为 10mm，坐标值最小的一角放置在原点，可以在 Data 中修改它的大小、放置位置、角度等信息。



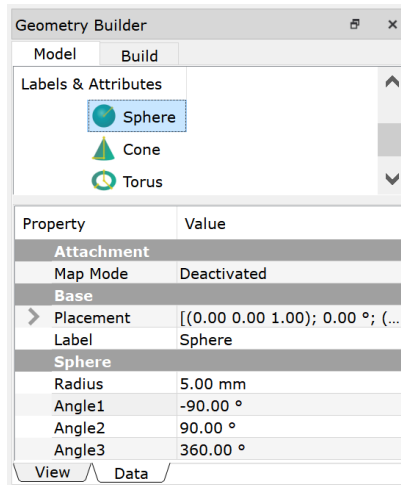
在 Geometry Builder->Data 中修改几何模块的信息

Cylinder 默认高度为 10mm，沿 z 方向，默认半径 2mm，可以在 Geometry Builder->Data 中修改扇形半径、扇形圆心角、高度以及放置位置、放置角度等信息。



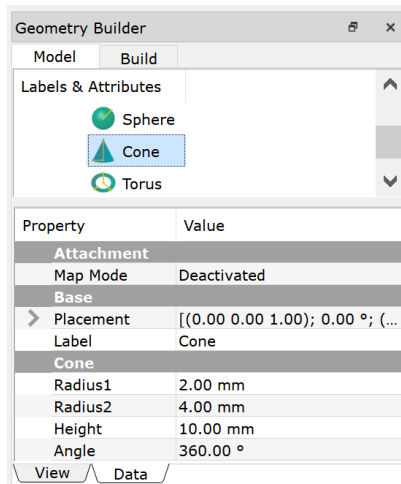
在Geometry Builder->Data中修改几何模块的信息

Sphere 默认半径为 5mm，默认为一个整球，可以在 Geometry Builder->Data 中修改 Angle1,Angle2 得到不同的截取角度，修改Angle3 可以得到不同圆心角（x-y 平面内圆的圆心角）的球。同样也可以修改 Sphere 的放置位置及放置角度。



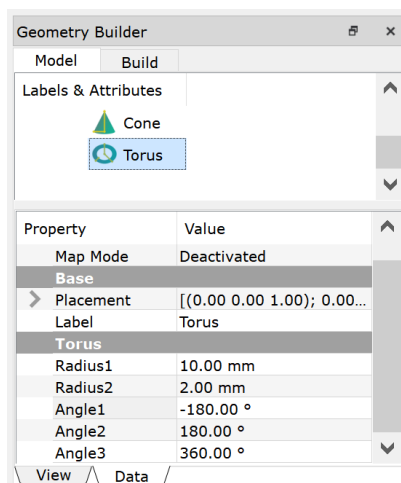
在Geometry Builder->Data中修改几何模块的信息

Cone 可以分别设置两端的半径，默认一端半径 Radius1 为 2mm，另一端半径 Radius2 为 4mm，扇形角 Angle 可以调整，默认为 360°（整圆），高度 Height 默认为 10mm，也可以调整。同样可以修改 Cone 的放置位置及放置角度 Placement。



在Geometry Builder->Data中修改几何模块的信息

Torus 的截面为圆，可以设置截面圆的半径 Radius2（默认为2mm），截面圆心到圆环中心的距离 Radius1 默认为 3mm，Angle3 为 Radius1 对应的圆心角，默认为 360°。同样可以修改 Torus的放置位置及放置角度 Placement。

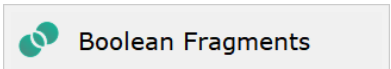


在Geometry Builder->Data中修改几何模块的信息

6.4.2. 3D 几何布尔操作

在所有几何建模完成后，要对 Geometry Builder 中的几何树进行以下三步操作，否则会在拾取几何（高亮）或者剖分网格时出错：

- 1. 对几何树中的所有分支进行布尔操作，即将几何体全部选中后，点击 Boolean Fragments 选项。



Boolean Fragments 图标

- 2. 建模完成后，请点击 Update 按钮刷新几何关联信息，然后才可以进行几何拾取或者几何高亮的操作。导入已经建模完成的工程时会自动运行Update几何刷新。



Update 图标

如果在拾取几何（或高亮显示物理信息与几何的关联情况）时需要在隐藏顶层几何后选择下层几何体，被选择的下层几何体所包含的顶点和内心必须与顶层几何遍历内部区域所对应的区域所包含的顶点与内心一致，否则无法选中该下层几何体。如果点击Update刷新几何信息后仍在关联几何时发生无法拾取或者无法高亮的问题，那么很可能出现了前面所说的这种问题。请依据需要按照以下两点对有重合区域或接触区域的几何进行修改。

- 1. 如果两个几何有重合的区域，为了显示出被隐藏的几何，需要将它们切割为可以分离的三个几何。

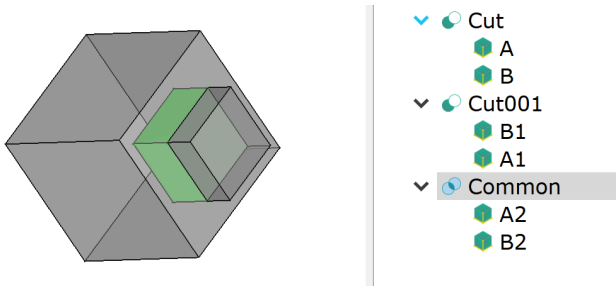
首先将这两个几何复制两次，简记为 A, A1, A2与B, B1, B2，点击A, B后，点击 Cut 按钮，得到 A 与 B 的差集 CutA；然后点击 B1, A1后，点击 Cut 按钮，得到 B 与 A 的差集 CutB；最后点击 A2, B2后，点击 Common 按钮，得到 A 与 B 的交集 CommonAB。这样就得到了可以分离开来的三块几何。隐藏 CutA 与 CutB 后就可以对 CommonAB 中的体或面进行几何拾取。



Cut 图标



Common 图标



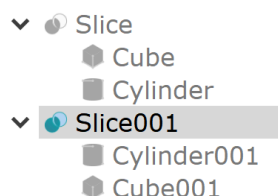
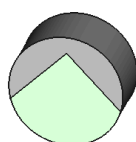
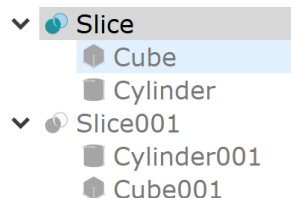
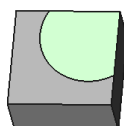
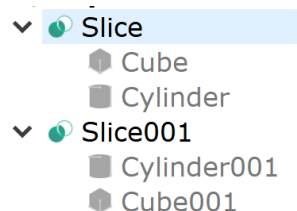
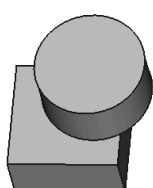
通过Cut和Common得到隐藏的区域

类似地，如果想要在几何体中增加一个截面，也需要用这种方式进行处理，此时可以新建一个辅助几何，用于与原几何进行Cut或Common操作以获取截面。

2. 如果两个几何有不完全重合的表面，那么需要对这两个几何进行Slice操作，才能对相关的体和面进行正确的几何拾取。



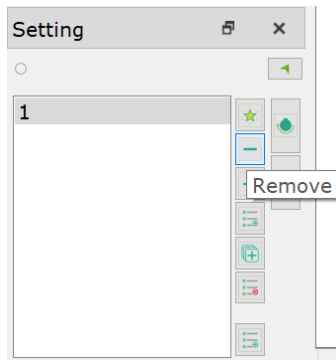
Slice 图标



通过Slice得到切面

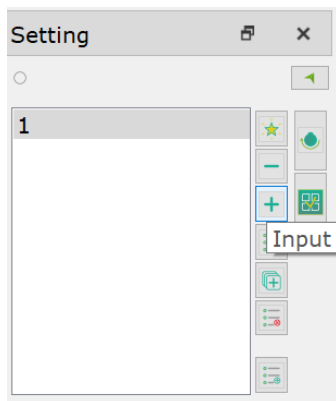
6.5. 几何选取

对材料和物理特性进行几何关联时，可以通过鼠标点击几何、在 Setting 中点 Input 按钮直接添加几何编号以及通过选择某个分组选择其包含的所有几何，这三种方式进行选取。通过鼠标点击几何，每次可以选取选中的1个面或者体；选中Setting中已选的某个编号，点击Setting 中的 Remove 按钮，可以删除该编号，Remove 按钮为第一列第二个，如下图蓝色框中所示：



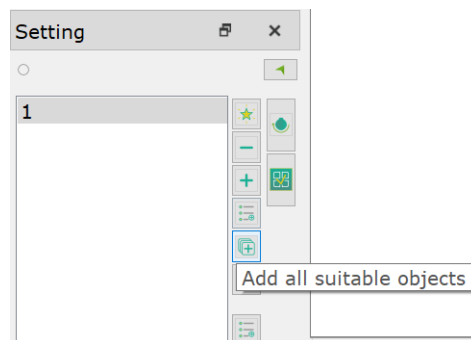
Setting中删除编号

点 Input，可以通过填入数字添加任意多个几何编号，编号之间用英文半角逗号隔开，Input 按钮为第一列第三个，如下图所示：



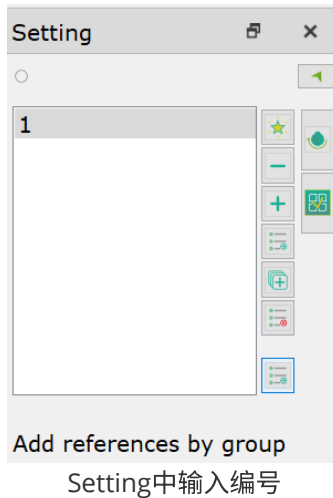
Setting中输入编号

点 Add all suitable objects，将添加所有几何编号，该按钮为第一列第 5 个，如下图所示：



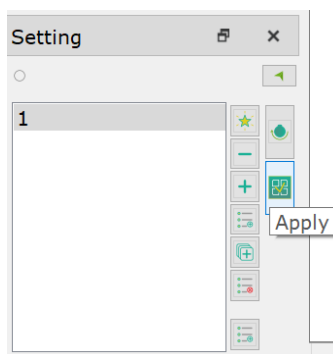
Setting中输入编号

也可以通过选择几何分组的方式来添加已分好的一组几何，该按钮为第一列最后一个，如下图所示。创建分组的方法见下节。



Setting中输入编号

选择几何后，需要点击 Apply 按钮，才可以对已选的几何编号进行保存，Apply按钮为最右侧一列中最下方的按钮，如下图蓝色框中所示：



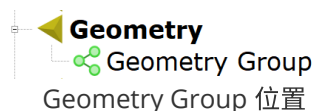
保存Setting中已选编号

在 Geometry Mode 几何模式下对物理参数与几何进行关联时，在 3D 问题中，针对 Boundary Condition, Excitation, Port 等需要关联几何面的情况，平台支持通过选择几何体来选中该几何体包含的所有面。点击要进行几何关联的物理参数项，然后点击平台上方Geometry->Geometry selection mode，在弹出窗口中选择 Domain boundary，然后再选择几何体，就可以同时选择该体的所有面。

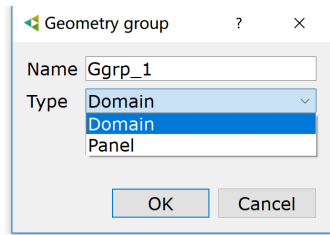
6.6. 几何分组

EMPbridge引入几何分组功能，方便用户对几何体进行分组管理。利用几何分组可以将同一材料或拥有同一物理特性的几何体进行分组，方便后续材料及物理特性部分的几何关联操作。同时，将材料与几何关联后，将自动生成以材料名称命名的分组，方便后处理观察该与材料关联的几何区域的结果。此外还可以将希望在后处理中观察的几何体进行分组，方便后处理选取几何体操作。建议用户将网格剖分、物理特性设置和后处理设置中需要多次集中选取的几何体进行分组，避免由鼠标逐个点选导致的繁琐操作。

在 Geometry 下可以进行几何分组，点开 Geometry 左侧的“+”号展开就可以看到 Geometry Group：

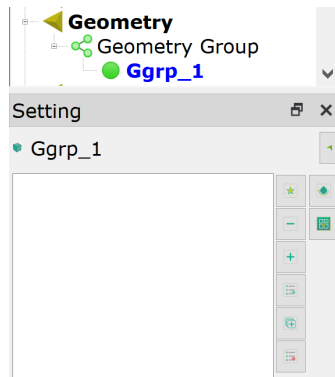


在 Geometry Group 上点右键可以进入几何分组设置界面，在这个界面里可以设置分组的名字和类型（Domain 或 Panel），点 OK 确定。



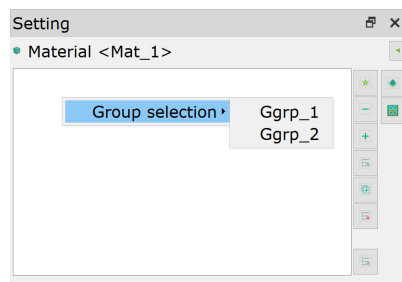
Geometry Group 设置界面

确定后，点击分组名称，就可以在几何上进行点选，点选的结果会显示在Setting窗口中。也可以通过在Setting窗口中点击“+”号，通过直接输入几何编号的方式来添加几何。



Geometry Group Setting 界面

在材料、后处理等关联几何时，可以通过已经建立好的分组来进行选择，在相应的 Setting 框中，点击右键会出现 Group selection 框，鼠标放到 Group selection 后会出现可以选择的分组，此时可以点击需要的分组，最后点击 Apply，就可以将相应分组的几何与该物理量关联起来。



Geometry Group Selection 界面



Setting Apply 按钮

7. 网格剖分（Mesh）

平台支持由几何模型剖分网格，也支持从文件导入网格。网格创建后，可以选择查看某特定区域上的网格。

在对几何模型进行网格剖分时，在 1.26 版本中我们推荐使用 Gmsh 进行网格剖分。虽然 Gmsh 为开源软件，但是我们没有分发它的权力，所以请用户自行下载后，将 gmsh.exe 放置到 bin 文件夹下即可使用。更多的网格剖分工具及选项将逐步开放。

7.1. 网格导入和导出

7.1.1 网格导入

目前支持 COMSOL 网格文件 .mphtxt 的导入。设置步骤如下：

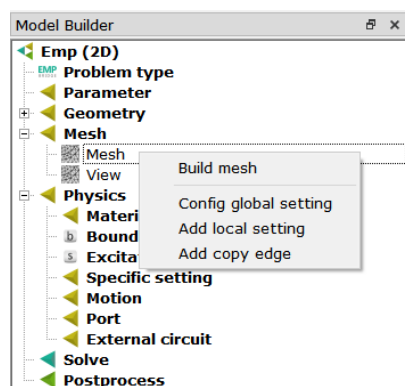
1. 设置 Mesh Mode。在 Model Builder 窗口中，右键 Project 名称->Set Geometry Mode 中可以选择 Geometry Mode 或 Mesh Mode，默认为 Geometry Mode。网格导入需要在 Mesh Mode 下完成。
2. 在工程树 Mesh->Mesh 右键，右键菜单里选择 Import mesh，选择支持格式的网格文件。平台导入网格成功后，会在工程树 Mesh 下生成导入网格的 mesh 结点。
3. 在主界面菜单栏空白处右键打开 View Controller 可以显示导入网格的区域、边界分组，控制分区域的显示/隐藏。

7.1.2 网格导出

在 Geometry Mode 下剖分的网格支持 COMSOL 网格格式 .mphtxt 文件的导出。方法是右键工程树 Mesh->Mesh 节点，选择 export to .mphtxt，可以导出当前网格到指定的 .mphtxt 文件。

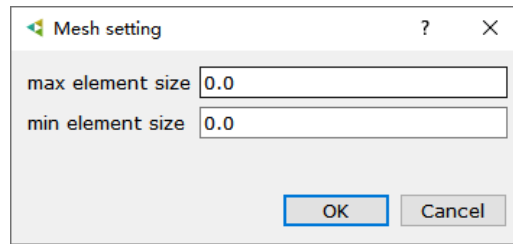
7.2. 网格剖分设置

在 Geometry Mode 下，右键点击模型树中网格剖分（Mesh）结点可以设置全局和局部单元尺寸，并执行剖分。



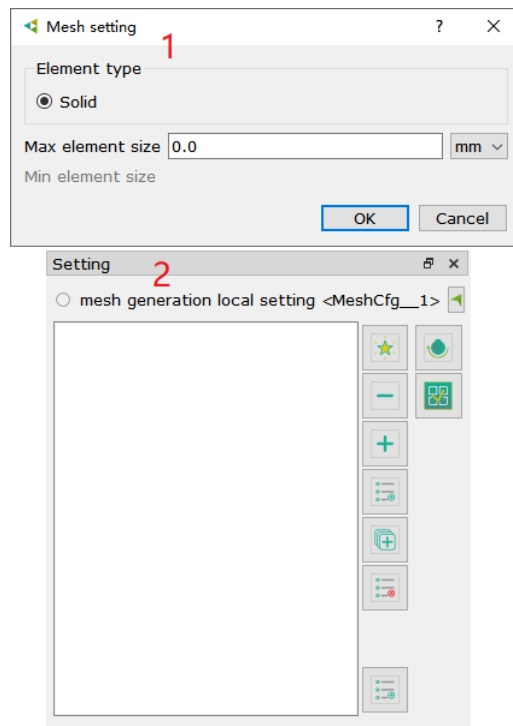
模型树网格结点右键菜单

- Build mesh : 对目前的几何模型执行网格剖分。
- Config global setting : 设置全局单元尺寸最大值、最小值。默认值为0，表示根据模型整体尺寸自动给定单元大小。



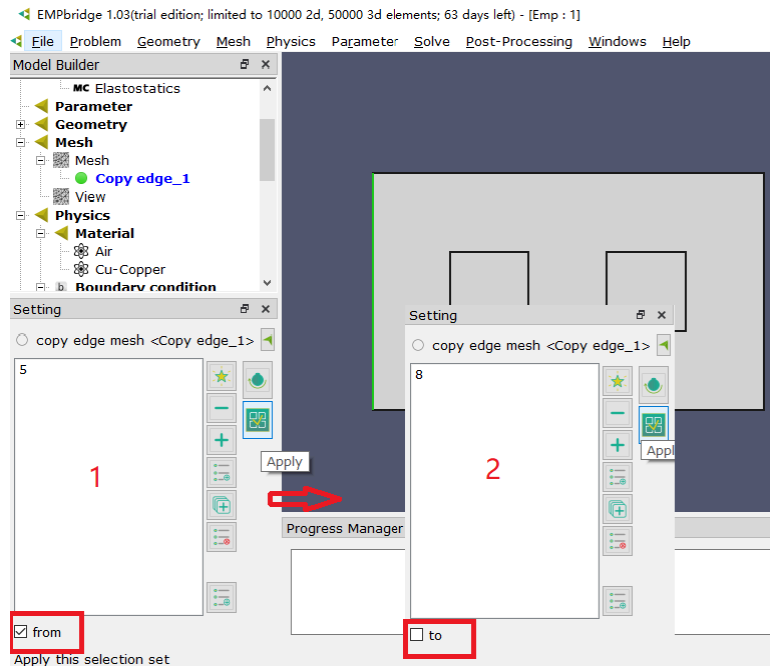
设置全局单元尺寸

- Add local setting : 设置局部几何区域单元尺寸的最大值。默认值为0，表示根据模型整体尺寸自动给定单元大小。



1 设置局部几何区域单元尺寸的最大值； 2 在 Setting 栏中选取对应的几何区域。

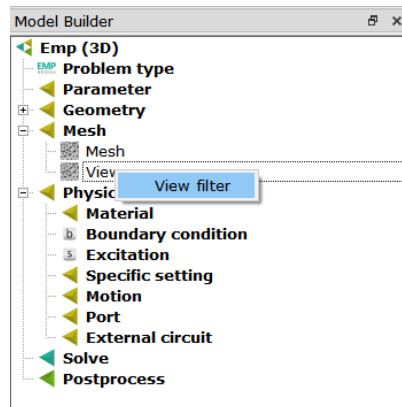
- Add copy edge : 对于2D 模型，支持边网格复制以满足周期边界上网格一致的要求。
 1 点击 Mesh->copy edge 结点，在 Setting 栏中从图形界面选取边网格从哪几条边拷贝，点击 Apply 按钮确认。
 2 点击 Setting 栏左下角 from 复选框切换到 to 状态，从图形界面选取将网格拷贝到对应的哪几条边，点击 Apply 按钮确认。



1 设置边网格从哪里拷贝；2 设置边界网格拷贝到哪里。

7.3. 显示指定区域的网格

通过模型树右键 Mesh-> View，增加设置局部几何区域网格显示的结点 View filter。在下方 Setting 栏中可以选取需要显示网格的几何区域。

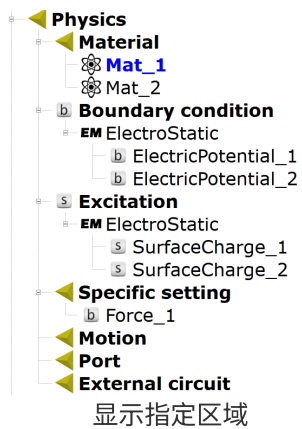


显示指定区域的网格

7.4. 网格模式下的拾取和高亮

在 Mesh Mode 下，将问题类型的物理参数与几何进行关联后，可以通过点击工程树上相应的物理参数结点来高亮相应的几何。在 1.26 版本中，当从一个参数结点切换到另一种参数结点时，需要先在空白处点击一下，才能在下次点击时正确高亮。

以ElectroStatic的物理参数设置为例，可以设置的参数包括Material, Boundary Condition, Excitation, Specific setting, Motion, Port, External circuit，下图中已经设置了两种材料，两个边界条件，点击Mat_1, Mat_2时会高亮关联的几何。（点击Mat_1或Mat_2后，需要先在几何旁边空白处点击一下，再点击ElectricPotential_1, ElectricPotential_2等其他物理参数的项，才能得到正确的高亮结果。）

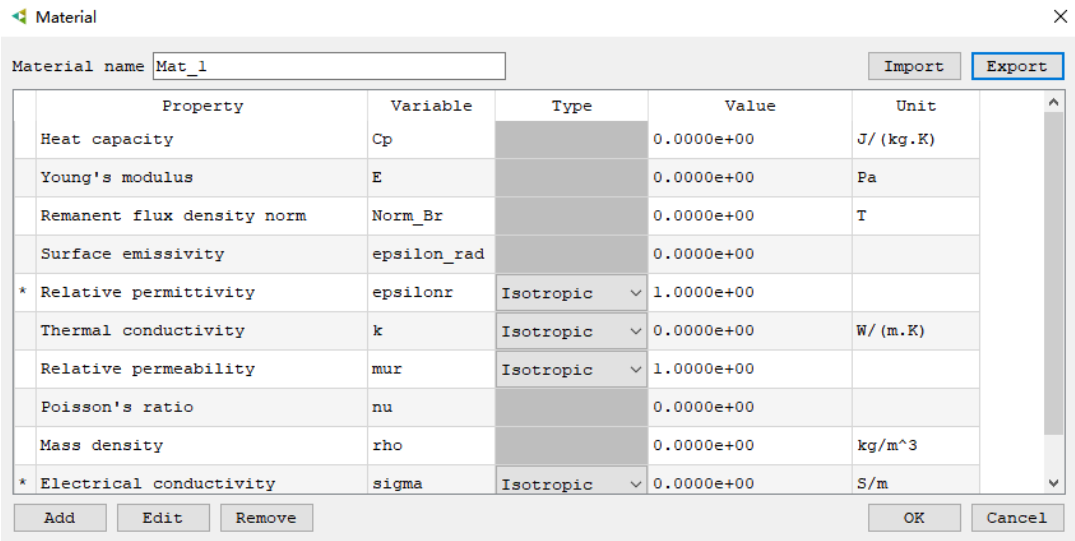


8. 物理特性设置（Physics）

8.1. 材料设置（Material）

8.1.1. 材料库

通过在工程树的Material结点右键点击 “Add Material” 激活材料设置对话框：



材料设置对话框

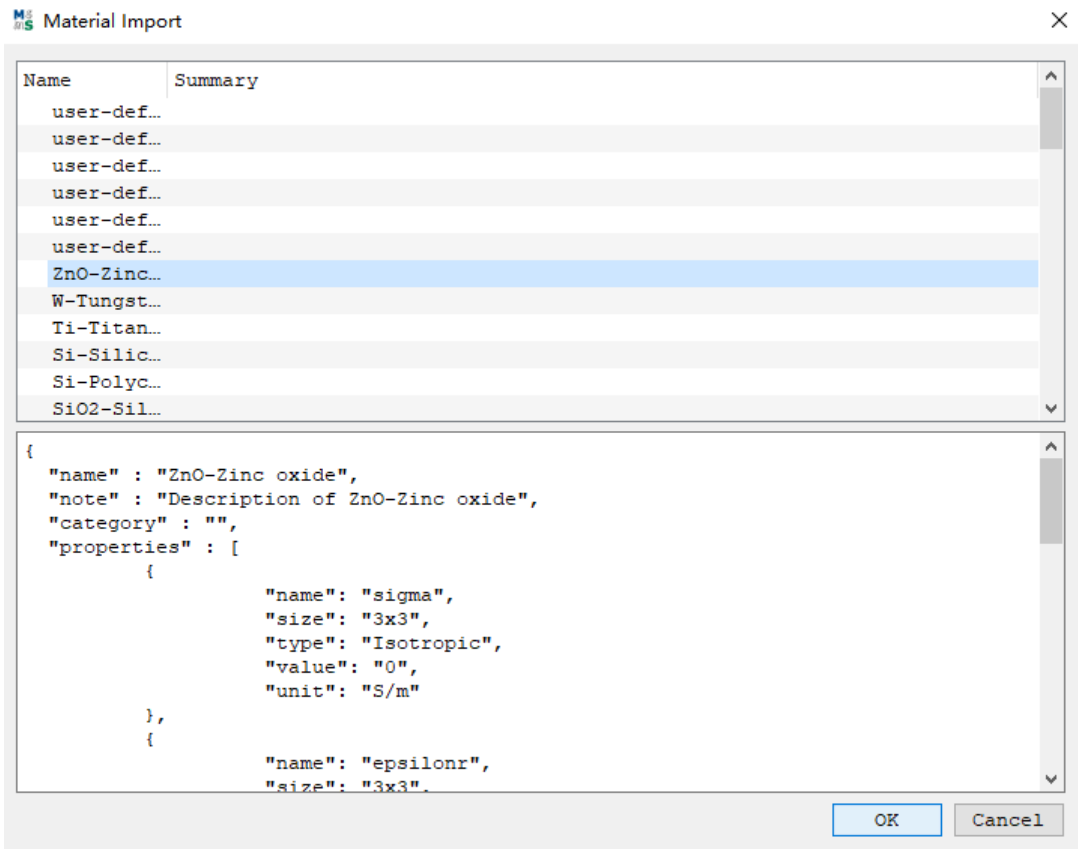
用户可以在材料属性列表中对材料进行设置，在 Type 栏的下拉列表中，支持材料属性的各向异性和非线性设置。

1. 26版本支持的材料特性和相关分析类型在下表中列出：

材料参数	名称	单位	相关分析类型
mur	相对磁导率	1	静磁场、准静磁场
Norm_Br	剩余磁通密度模值	T	静磁场、准静磁场
sigma	电导率	S/m	静电场、恒定电流场、准静磁场
Cp	恒压热容	J/(kg*K)	热场
epsilon_r	相对介电常数	1	静电场
rho	密度	kg/m^3	结构力场
k	导热系数	W/(m*K)	热场
alpha	电阻率温度系数	1/K	热场
E	杨氏模量	Pa	结构力场
nu	泊松比	1	结构力场

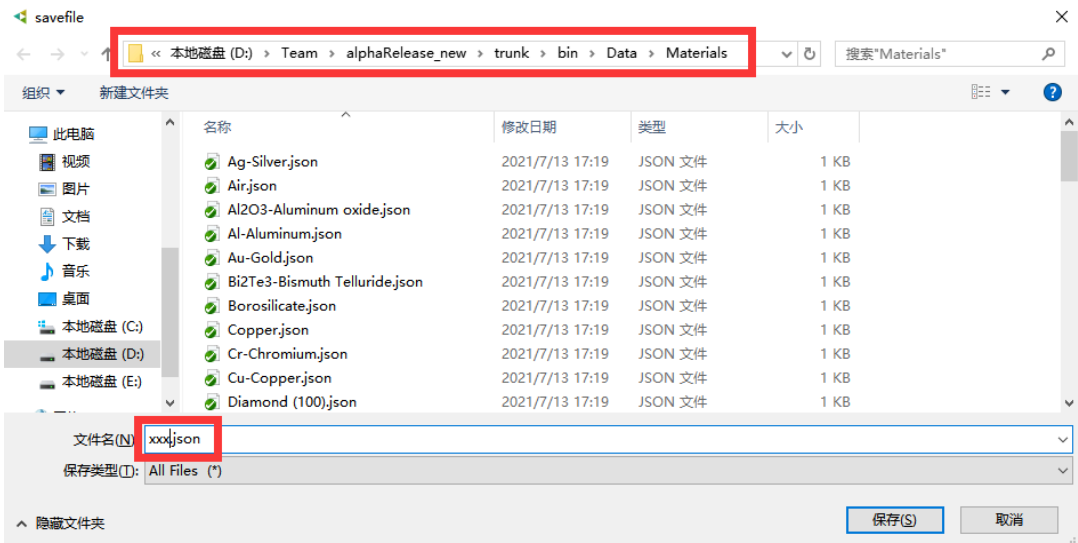
8.1.2. 从材料库导入和导出材料

在材料设置对话框右上角点击 Import，弹出 Material Import 对话框，可打开平台材料库。EMPbridge 提供了常用材料材料库，用户可在其中进行选择。双击所要添加的材料，此时材料的详细信息会显示在对话框下半栏中，点击 OK 即可添加材料，如下图所示。



材料导入界面

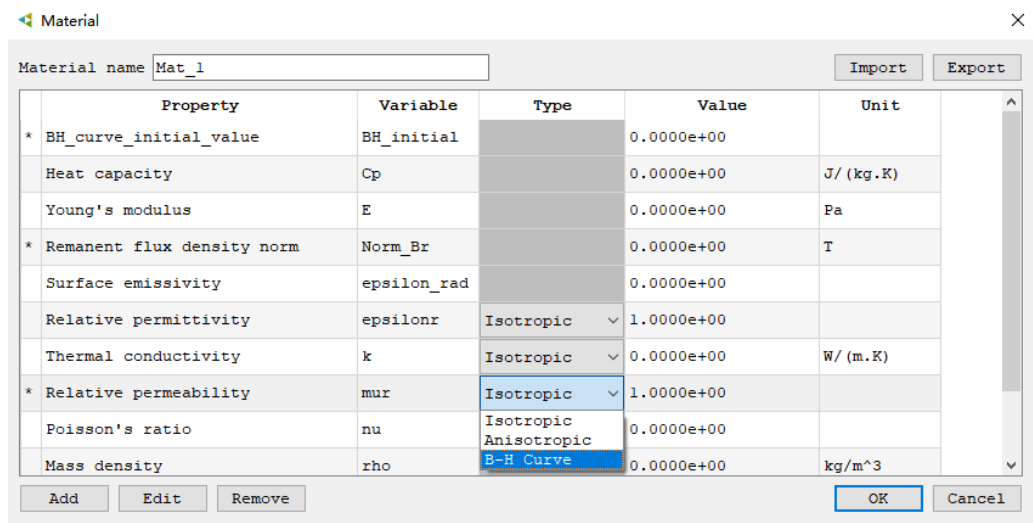
此外，用户可以将自定义材料存储在材料库中，方便后续建模时导入。设置自定义材料参数后，点击材料设置对话框右上角的 Export按钮, 即弹出 savefile 对话框，保存至材料库安装路径下的文件夹中，输入保存材料的名称，即材料文件名，点击保存即可。注意：保存文件名不可为空。



自定义材料保存界面

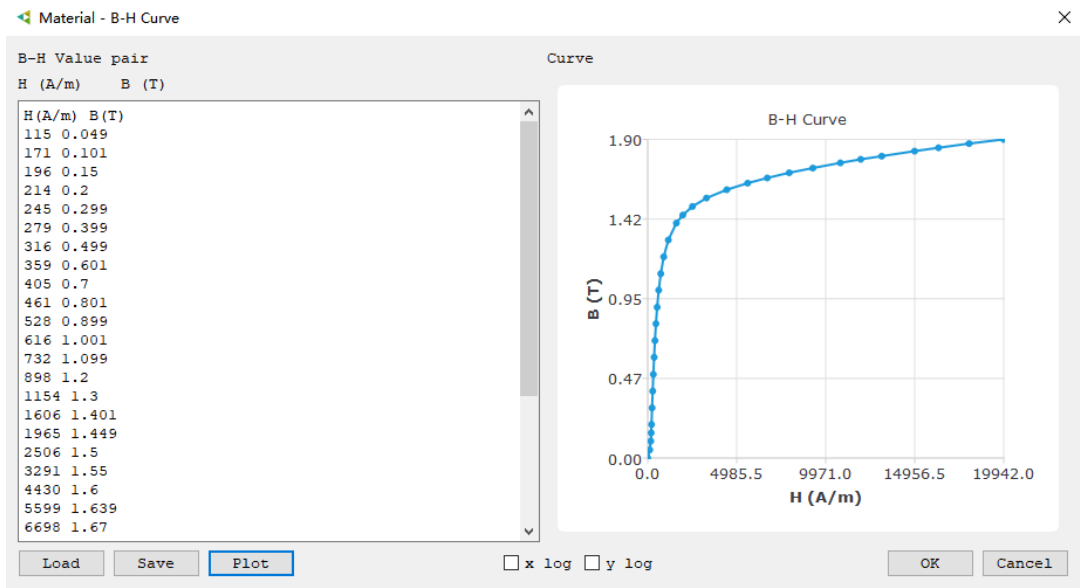
8.1.3. 非线性材料

1. 26版本支持磁性材料B-H曲线的输入：
- 在 Material 界面中材料参数 mur 行，点击 Type 栏下拉菜单，选择 B-H curve，如图所示。



BH曲线设置界面

弹出 Material - B-H Curve 界面，点击 Load，选择需要导入的 BH 曲线数据，点击 Plot, 如图所示，点击 OK 即可。
在BH_curve_initial_value 行，添加合适的初始磁导率值可以使非线性计算尽快地达到收敛。



BH曲线设置界面

8.1.4. 温变材料特性

在电热耦合分析中，1.26 版本支持电导率和磁导率随温度变化的解析函数输入。

Material

Material name
Cu-Copper
Import
Export

Property	Variable	Type	Value	Unit
* Heat capacity	Cp		3.8400e+02	J/(kg.K)
Young's modulus	E		1.2000e+11	pa
Thermal expansion coefficient	alpha	Isotropic	1.6500e-05	
Relative permittivity	epsilon _r	Isotropic	1.0000e+00	
* Thermal conductivity	k	Isotropic	4.0100e+02	W/(m.K)
Relative permeability	mu _r	Isotropic	1.0000e+00	
Poisson's ratio	nu		3.4000e-01	
Mass density	rho		8.9400e+03	kg/m³
Electrical conductivity	sigma	Isotropic	5.9980e+07*(T-300)	S/m

Add
Edit
Remove
OK
Cancel

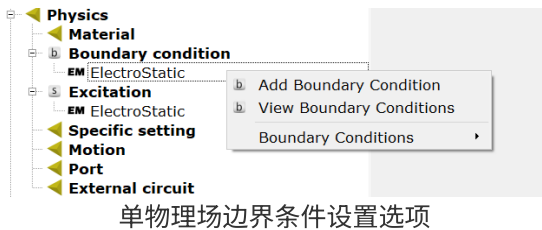
电导率随温度变化的解析表达式

8.2. 边界条件设置（Boundary condition）

在工程树上的 Boundary condition节点进行边界条件的设置，对于单场和多物理耦合分析，边界条件的设置略有不同，本节将分别进行说明。

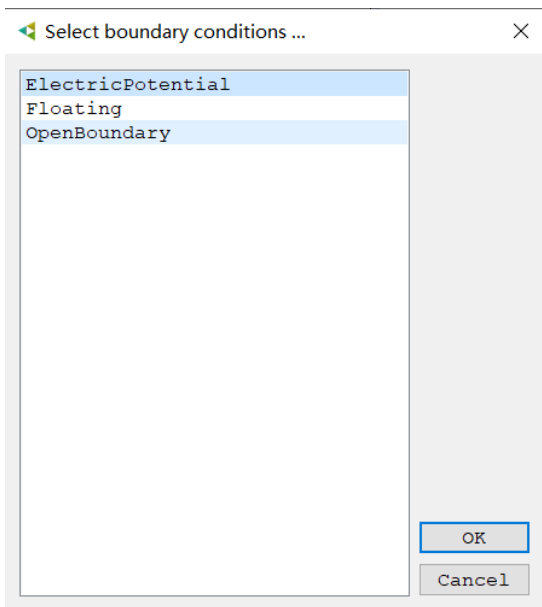
8.2.1. 单物理场分析中的边界条件设置

在此以单物理场分析中的静电场分析为例对边界条件的设置进行说明，其他单场的操作与此相同。选定问题类型后，在 Boundary condition 节点下问题类型的名字，右键问题类型的名字弹出边界条件设置菜单。



8.2.1.1. 添加边界条件

选择 Add Boundary Condition 弹出添加边界条件的窗口，在窗口中选择相应的边界条件并点击OK进行添加。或者直接通过Boundary Conditions列表中进行选取，并点击添加相应边界条件。



点击 Add Boundary Condition 弹出添加边界条件的窗口



以设置静电场问题的电势边界（ElectricPotential）为例演示边界条件设置界面。在Name中为边界条件的名称，在Property 列中展示了此边界条件设置的物理量的名称，在 Variable 列中展示此物理量的参数表示，在 Value 列中用户可以输入相应的数值大小，也可以输入相应的表达式。设置完毕后单击OK。

1. 26版目前仅支持关于时间 t 的表达式，表达式的格式支持三角函数、绝对值和基于不等式的逻辑判断（不等式成立时取值为1，不成立取值为0）。例如， $\sin(2 * t) + \cos(5 * t)$ ， $1.5 * \cos(1000 * \pi * t) * (\cos(1000 * \pi * t) >= 0)$ 。

Setup boundary condition for ElectroStatic (3D)

ElectricPotential

Name ElectricPotential_1

Property	Variable	Value	Unit
Voltage	v	0.	Volt

OK Cancel

边界条件数值输入界面

8.2.1.2. 查看边界条件

选择 View Boundary Condition 弹出窗口，以json文件格式显示边界条件设置的信息。

Emp2

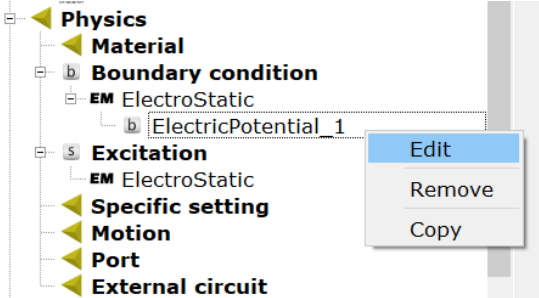
```
{
  "es": [
    {
      "Dirichlet": {
        "geo_id": -1,
        "geo_type": "p",
        "name": "ElectricPotential_1",
        "v_type": "scalar const",
        "value": 0
      }
    }
  ]
}
```

OK

查看边界条件信息

8.2.1.3. 编辑边界条件

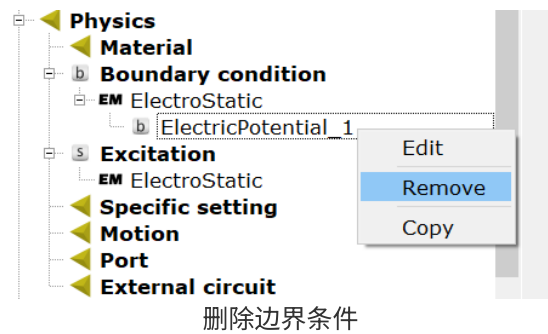
右键边界条件节点，选择Edit，弹出边界条件数值输入界面进行编辑。



编辑边界条件

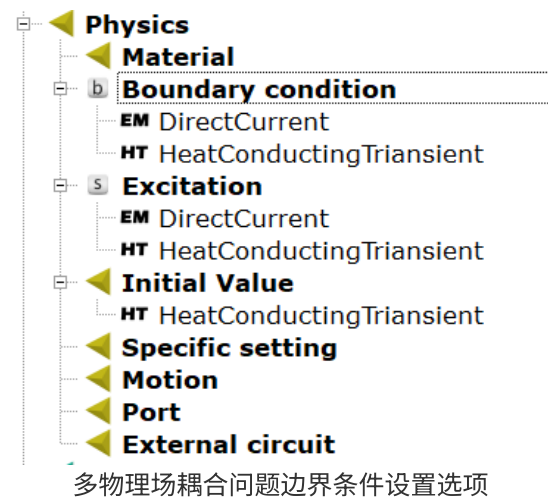
8.2.1.4. 删除边界条件

右键边界条件节点，选择Remove，移除此边界条件设置。



8.2.2. 多物理耦合分析中的边界条件设置

在此以多物理场耦合分析中的恒定电流-瞬态热场分析为例对边界条件的设置进行说明，其他多物理场耦合的操作与此相同。由于是多物理场耦合问题，因此在 Boundary condition 节点下同时出现两相互耦合的物理场的名字，右键两个不同问题类型的名字，弹出与该问题对应的边界条件，分别进行设置。



8.2.2.1. 添加边界条件

分别对耦合的物理场节点右键，选择 Add Boundary Condition 弹出添加边界条件的窗口，通过列表选择相应的边界条件并点击OK进行添加。以恒定电流-瞬态热场分析为例，首先右键 Boundary condition 下的 SteadyCurrent 节点，选择 Add Boundary Condition，再右键HeatConductingTrainsient节点，选择Add Boundary Condition。具体添加操作可参照[8.2.1.1节](#)。

8.2.2.2. 查看边界条件

在任意物理场节点右键，选择 View Boundary Condition 弹出窗口，可以同时查看所有耦合场的边界条件信息，此信息以json文件格式进行显示。



查看边界条件信息

8.2.2.3. 编辑边界条件

右键边界条件节点，选择Edit，弹出边界条件数值输入界面进行编辑。可参照[8.2.1.3节](#)配图说明。

8.2.2.4. 删除边界条件

右键边界条件节点，选择Remove，移除此边界条件设置。可参照[8.2.1.4节](#)配图说明。

8.3. 激励设置（Excitation）

在工程树上的 Excitation 节点进行激励的设置，对于单场和多物理耦合分析，激励的设置略有不同，本节将分别进行说明。

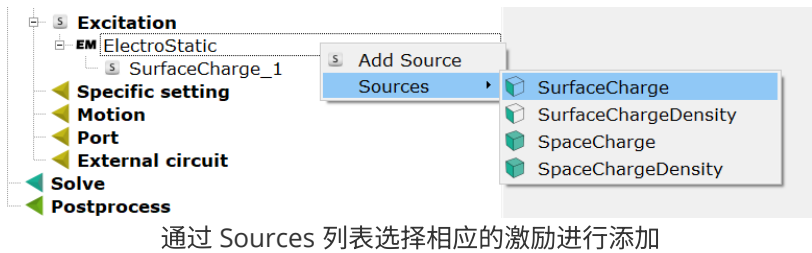
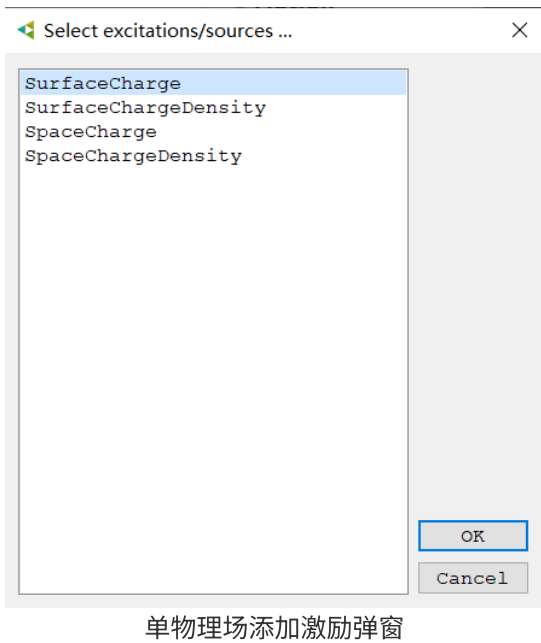
8.3.1. 单物理场分析中的激励设置

在此以单物理场分析中的静电场分析为例对激励的设置进行说明，其他单场的操作与此相同。在 Excitation 节点下出现问题类型的名字，右键问题类型的名字弹出激励设置菜单。



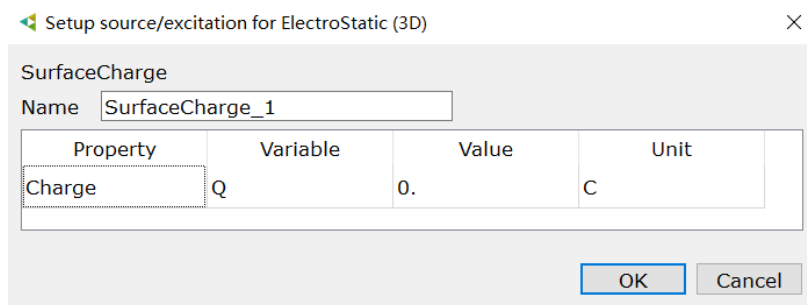
8.3.1.1. 添加激励

选择 Add Source 弹出添加边界条件的窗口，在窗口中选择相应的激励并点击OK进行添加。或者直接通过Sources菜单下的列表进行选取，并点击添加相应激励。



以添加静电场的表面电荷（SurfaceCharge）激励为例，演示激励设置界面。在Name中为激励的名称；在 Property 列中展示了此激励所对应物理量的名称；在 Variable 列中展示此物理量的参数名称；在 Value 列中用户可以输入数值（也可以输入相应的表达式）；在 Unit 列中显示了单位。设置完毕后单击OK。

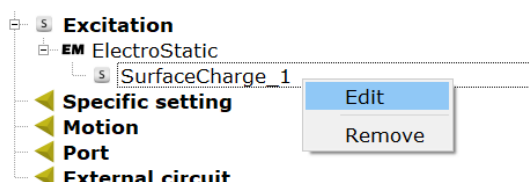
1.26 版目前仅支持关于时间 t 的表达式，表达式的格式支持三角函数、绝对值和基于不等式的逻辑判断（不等式成立时取值为1，不成立取值为0）。例如， $\sin(2 * t) + \cos(5 * t)$ ， $1.5 * \cos(1000 * pi * t) * (\cos(1000 * pi * t) >= 0)$ 。



添加激励设置界面

8.3.1.2. 编辑激励

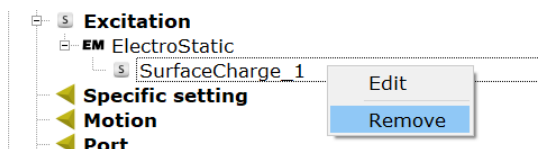
右键激励节点，选择Edit，弹出激励设置窗口进行编辑。



编辑激励设置

8.3.1.3. 删除激励

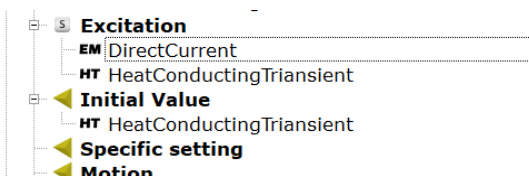
右键激励节点，选择Remove，删除此激励设置。



删除激励设置

8.3.2. 多物理耦合分析中的激励设置

在此以多物理场耦合分析中的恒定电流-瞬态热场分析为例对激励的设置进行说明，其他多物理场耦合的操作与此相同。由于是多物理场耦合问题，因此在 Excitation 节点下同时出现两相互耦合的物理场的名字，右键两不同问题类型的名字，弹出与该问题对应的边界条件，分别进行设置。



多物理场耦合问题激励设置选项

8.3.2.1. 添加激励

分别对耦合的物理场节点右键，选择 Add Source 弹出添加边界条件的窗口，通过列表选择相应的边界条件并点击OK进行添加。以恒定电流-瞬态热场分析为例，首先右键 Boundary condition 下的 SteadyCurrent 节点，选择 Add Source，再右键HeatConductingTrainsient节点，选择Add Source。具体添加操作可参照[8.3.1.1节](#)。

8.3.2.2. 编辑激励

右键激励节点，选择Edit，弹出激励设置界面进行编辑。可参照[8.3.1.2节](#)配图说明。

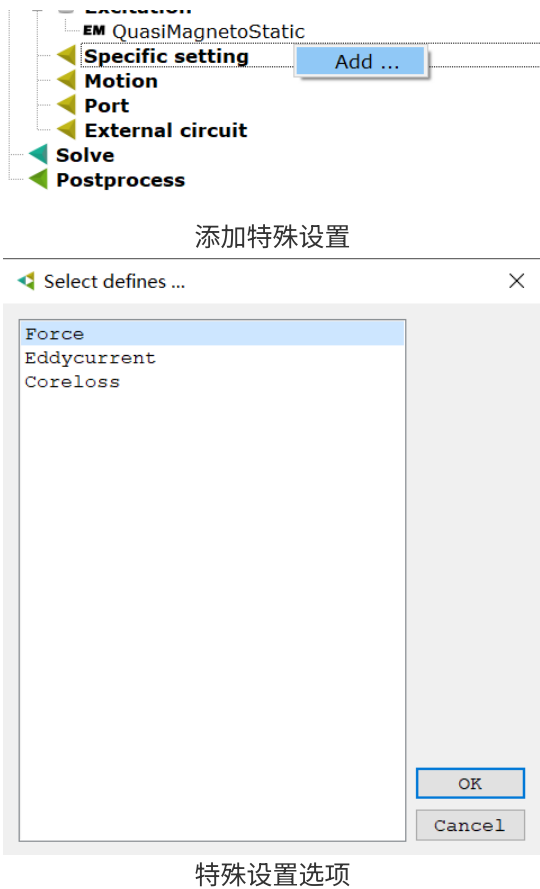
8.3.2.3. 删除激励

右键激励节点，选择Remove，移除此激励设置。可参照[8.3.1.3节](#)配图说明。

8.4. 特殊设置（Specific setting）

在 Specific setting 特殊设置下，根据不同的问题类型，可以标记需要计算涡流、电磁力或铁心损耗的区域。例如，在静磁场-静力场耦合问题中标记电磁力的计算区域，所计算的电磁力会自动作为荷载加载到静力学分析。

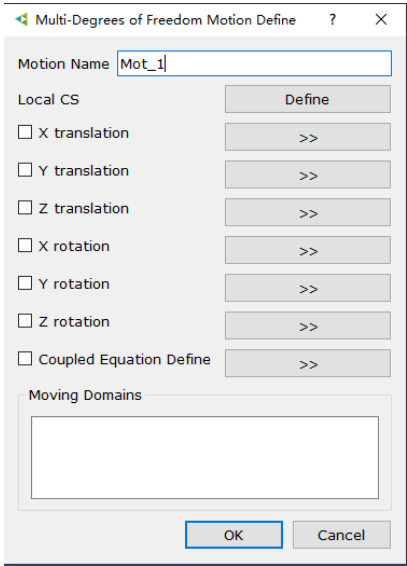
右键单击工程树上的 Specific setting 节点，选择 Add，弹出特殊设置窗口。选择希望添加的特殊设置类型：电磁力，涡流或铁心损耗，单击 OK 进行添加。添加结束后选中此节点，并与几何区域进行关联。



特殊设置选项

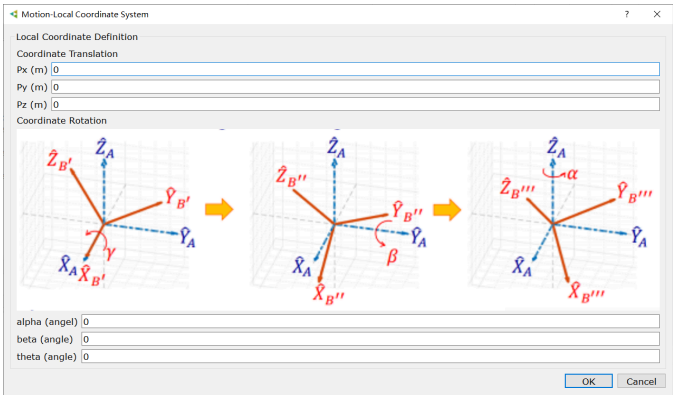
8.5. 运动设置（Motion）

EMPbridge v1.0 版本支持一个方向的转动或平动，运动的主界面如图所示：



运动主界面

在Local CS 按钮中用户可以定义系统的局部坐标系，当然在二维情况下一般不需要定义局部坐标系，如不定义，则默认是全局坐标系：

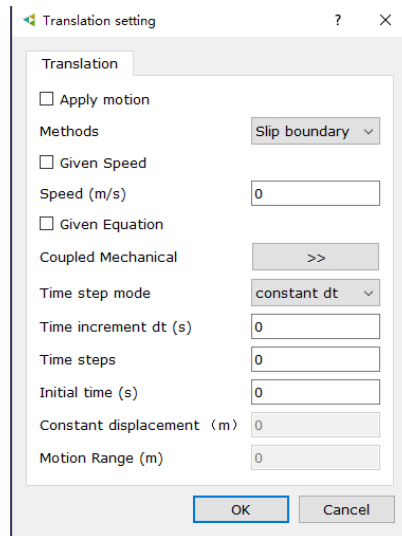


定义局部坐标系

用户可以通过勾选选择某一个方向的运动，通过右端的按钮进行具体运动参数的设置。Coupled Equation Define 按钮为考虑多自由度运动耦合的情况时输入耦合方程，version 1.26暂不支持。下面将分别介绍平动和转动的具体设置。

8.5.1. 平动(Translation setting)

分析物体直线运动时的电磁场问题，平动的界面设置为：



平动界面设置

- Apply motion: 勾选
- Methods: 选择平动采用的方法

目前平动支持的方法有两种：

- 滑移边界法(slip boundary)

滑移边界法通过改变运动带中dof的链接关系，来模拟物体直线运动。它的优点是计算速度快，但要求剖分——对应的运动带网格。

- 洛伦兹法(Lorentz)

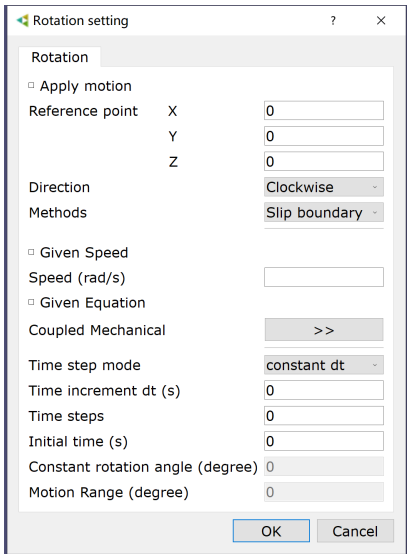
洛伦兹法通过在运动准静磁场的控制方程中添加洛伦兹项，用虚拟的位移来描述直线运动。它的优点是不需要网格的重剖分，但是这种方法仅适用于运动物体在运动方向上结构是连续的。

如果用户选择洛伦兹法，则运动步数为不可设置状态。

- Given speed: 勾选，则用户给定物体的运动速度
- Speed：物体运动的速度
- Given Equation：勾选，则根据给定的机械运动方程计算物体的运动速度
- Coupled Mechanical：设置机械运动方程及动网格（version 1.26 暂时不支持）
- Time step mode：下拉列表选择“constant dt”: 固定时间步长或“constant displacement”: 固定每步运动的位移
- Time increment dt：每步运动的时间步长
- Time steps：运动的步数
- Initial time: 初始时间
- Constant displacement：每步运动的位移
- Motion Range：总共运动的位移

8.5.2. 转动(Rotation setting)

分析物体相对某个点发生转动时的电磁场问题，转动问题的界面设置为：



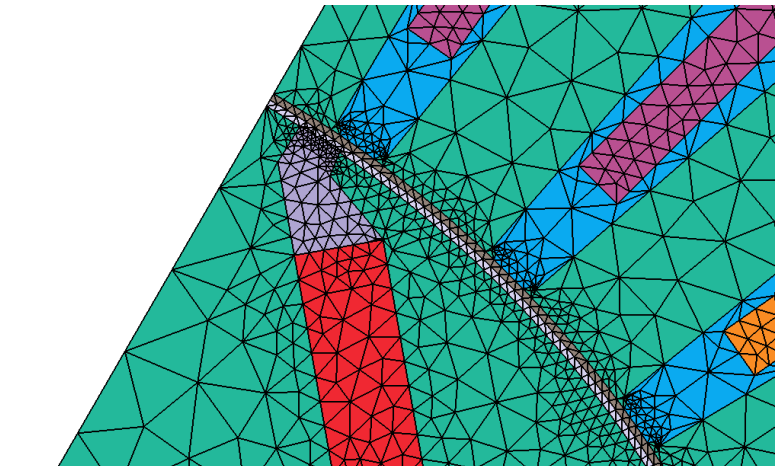
转动界面设置

- Apply motion: 勾选
- Reference point : 转动的参考点
- Direction : 顺时针或逆时针转动
- Methods: 选择转动采用的方法

目前转动支持的方法有：

- 滑移边界法(slip boundary)

滑移边界法通过改变运动带中dof的链接关系，来模拟物体的旋转运动。它的优点是计算速度快，但要求剖分一对应的运动带网格，如图在蓝色区域（紧挨着运动区域的一层网格）的上边界和下边界的节点数需相同，且蓝色区域只有一层网格。



运动带所需一一对应的网格

- 洛伦兹法(Lorentz)

洛伦兹法通过在场的方程中添加洛伦兹项，用虚拟的位移来描述以固定速度运动时的场的分布。它的优点是不需要网格的重剖分，但是这种方法仅适用于运动物体在运动方向上结构是连续的情况，且洛伦兹方法不会让物体发生真实的转动。

如果用户选择洛伦兹法，则运动步数为不可设置状态。

- Given speed: 勾选，物体的转动速度是给定的
- Speed : 物体的转速
- Given Equation : 勾选，则由给定的机械运动方程求得转速
- Coupled Mechanical : 设置机械运动方程 (version 1.26 暂时不支持)
- Time step mode : 可选择固定时间或固定每步转动的角度
- Time increment dt : 每步转动的时间步长
- Time steps: 转动的步数
- Initial time: 初始时间
- Constant displacement : 每步转动的角度
- Motion Range : 总共转动的角度

8.6. 端口设置（Port）

EMPbridge Port 端口有两个主要的功能：用于电路集总参数提取，以及作为场和路的连接端口。

EMPbridge v1.26 版本支持的 Port 包括：

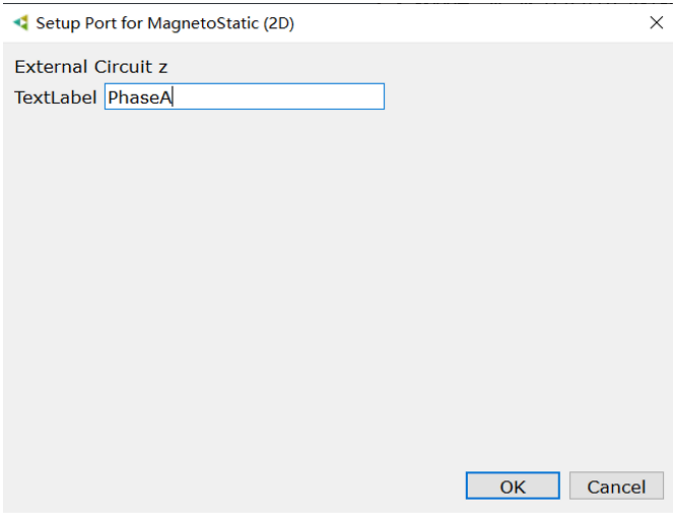
- External Circuit z: 二维外电路与场接口（2D）
- Capacitance Extraction : 三维静电场电容提取端口（3D）
- Inductance Extraction : 三维静磁场电感提取端口（3D）

当用户进行了电容提取或者电感提取端口设置，EMPbridge 将自动进行参数提取，将结果输出为电容矩阵或者电感矩阵。

下面将分别介绍不同端口 Port 的设置。

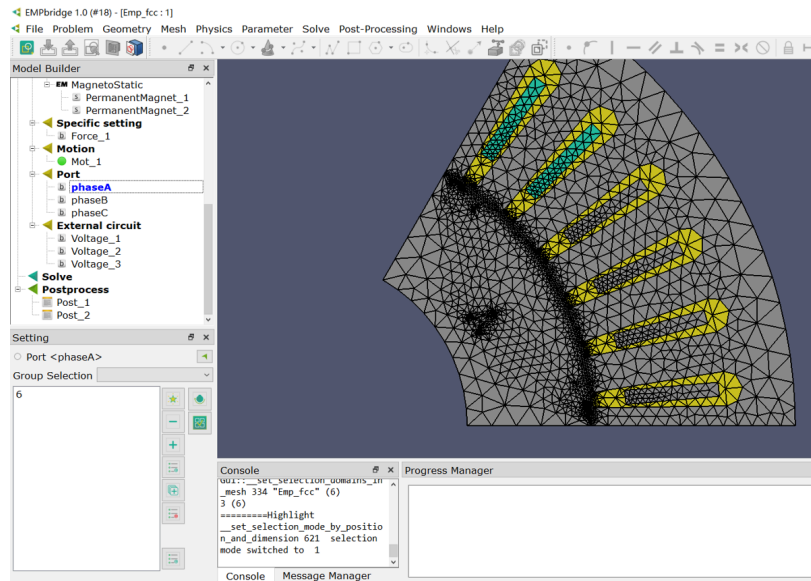
8.6.1. 场路连接端口External Circuit z（2D）

场路连接端口界面为：



场路连接端口Port

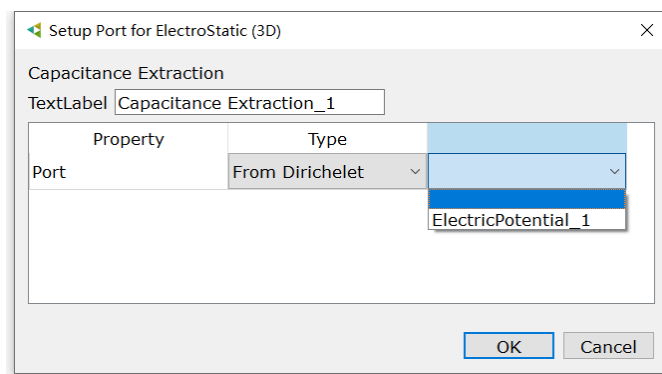
用户在右键 add 增加 port 后需要进行几何关联，以确定端口在所对应的场中所在的区域位置。



Port关联区域

8.6.2. 电容提取端口Capacitance Extraction (3D)

电容提取端口界面为：

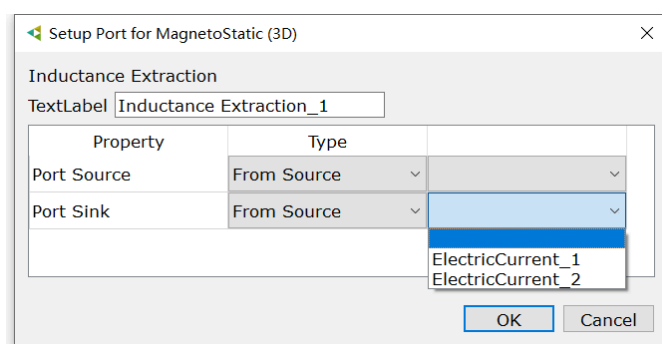


电容提取端口Port

用户在右键add增加port后，在type选项中选择From Dirichelet，然后在下拉菜单中选择从已设置的电势边界条件中继承边界条件作为端口，以确定端口在所对应的场中所在的区域位置。

8.6.3. 电感提取端口Inductance Extraction (3D)

电感提取端口界面为：



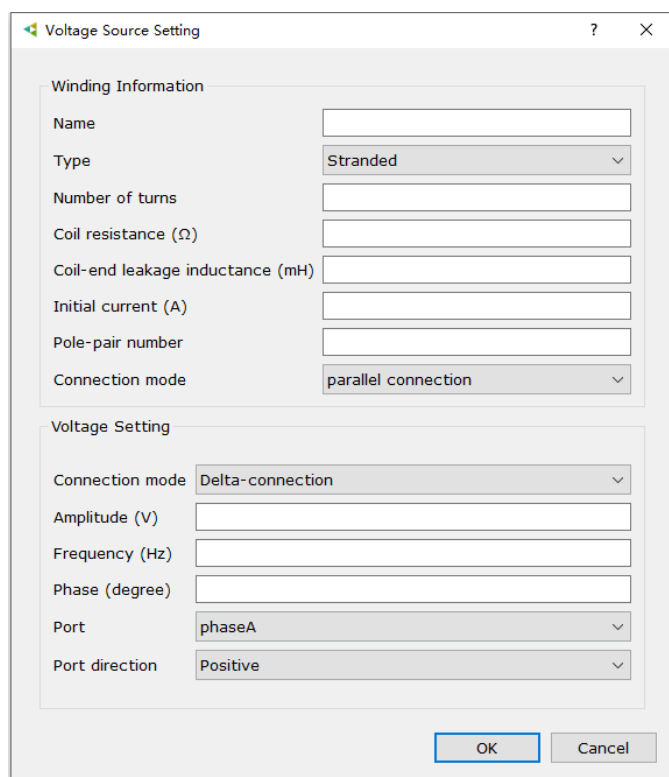
电感提取端口Port

用户在右键 add 增加 port 后，在 type 选项选择 From Source，然后下拉菜单中选择从已设置的电流激励中继承电流源作为端口，以确定端口所对应的场中所在的区域位置。电流 port 需要设置 port source 和 port sink 分别作为电流端口的输入和输出。

8.7. 外电路设置 (External circuit)

EMPbridge 通过 port 来实现场和路的耦合。首先在工程树上右键添加端口 Port，其界面和设置说明请见[节9](#)。

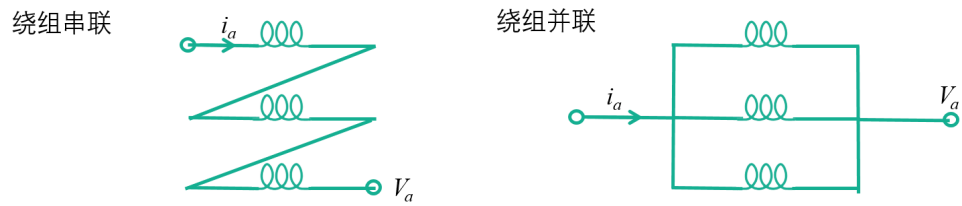
通过在工程树上右键 External circuit 用户可以添加电压源激励 Voltage 和外部电路拓扑 Circuit。用户需根据线圈个数添加多个 Voltage，需要说明的是 version 1.26 只支持添加电压源激励，默认定义线圈的电阻和端部漏电感，不支持任意形式的外电路拓扑。点击添加 Voltage：

The image shows a 'Voltage Source Setting' dialog box with two main sections: 'Winding Information' and 'Voltage Setting'. The 'Winding Information' section includes fields for Name, Type (set to Stranded), Number of turns, Coil resistance (Ω), Coil-end leakage inductance (mH), Initial current (A), Pole-pair number, and Connection mode (set to parallel connection). The 'Voltage Setting' section includes fields for Connection mode (set to Delta-connection), Amplitude (V), Frequency (Hz), Phase (degree), Port (set to phaseA), and Port direction (set to Positive). At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

电压源及线圈参数设置

Winding Information

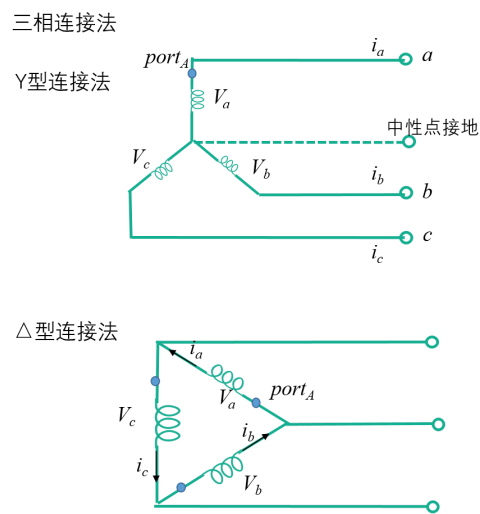
- Name : 填写线圈名字
- Type : 线圈类型，2D 默认是 Stranded.
- Number of turns : 填写线圈匝数
- Coil resistance : 填写线圈电阻
- Coil-end leakage inductance : 填写端部漏电感
- Initial current : 设置回路初始电流值
- Pole-pair number : 极对数
- Connection mode : 每相绕组串并联方式



绕组串并联方式设置

Voltage Setting

- Connection mode: 相间连接方式 (星型连接/三角形连接)



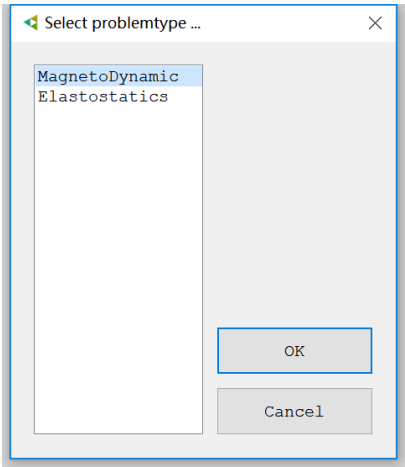
相间连接方式设置

- Amplitude : 电压源幅值
- Frequency : 电压源频率
- Phase : 电压源相位
- Port : 与场耦合接口，此处需下拉菜单选取之前定义的 port
- Port direction : 定义 port 的参考方向

9. 求解器设置 (Solve)

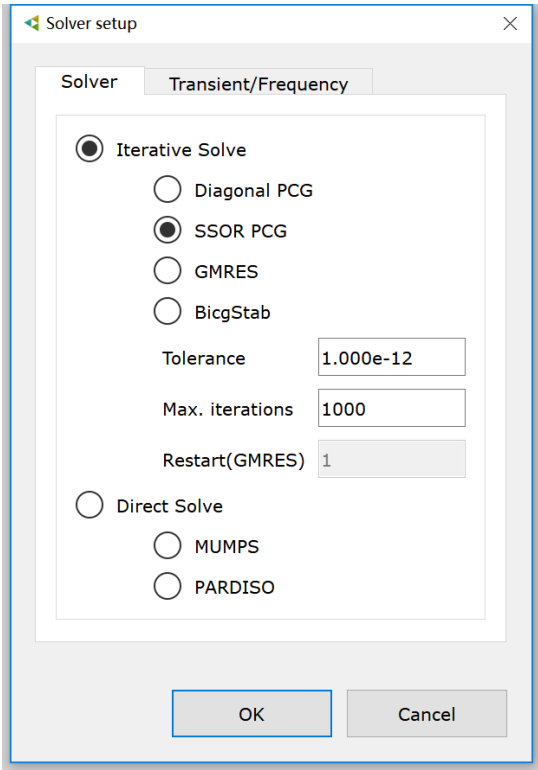
9.1. 求解器界面与参数设置

在 Solver 上点右键，选择 Setup，如果是多物理场，那么首先进入物理场选择，选定物理场后，可以进入对应场的 Solver setup 界面。如果是单场，那么直接进入 Solver setup 界面。

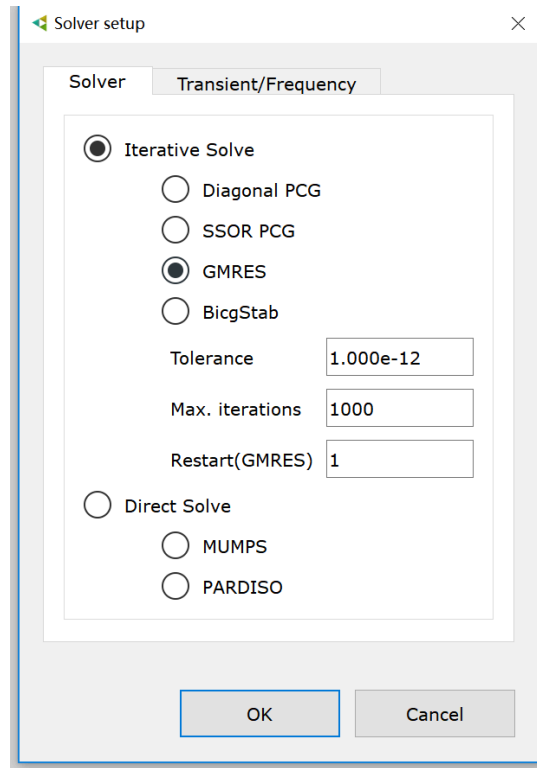


多物理场问题选择设置求解器的场

进入 Solver setup 界面后，默认设置的求解器类型为 SSOR PCG 迭代法，可以设置的参数包括 Tolerance 和 Max.iterations，其中Tolerance 表示判定求解是否收敛的残差阈值，默认值为1e-12，Max.iterations 为迭代法的最大迭代次数，默认值为 1000。如果采用Diagonal PCG 迭代法和 BicgStab 迭代法，它们可以设置的参数与 SSOR PCG 相同。如果选择GMRES 迭代法，则增加了一个参数 Restart，默认值为1，这个参数会影响收敛速度，可以将 Restart调大一些，比如设置为200,300等值。



Solver setup 默认界面



Solver setup GMRES 界面

9.2. 求解器类型选择

1. Diagonal PCG 要求求解的矩阵为对称正定矩阵，矩阵满足严格对角占优，对角线元素均为正数。对于满足以上条件的矩阵，该方法求解效率较高。
2. SSOR PCG 要求求解的矩阵为对称正定矩阵。该方法在求解满足条件的矩阵方程组时具有较好的收敛速度和稳定性，是默认求解器。
3. GMRES 可以用于求解非对称、非正定矩阵方程组，1.26 版本中只支持实数矩阵。Restart 参数不能超过矩阵维数，因此默认值设置为1，但若要想取得较好的收敛速度，需要将 Restart 调大，如设置为200，300等值。
4. BicgStab 可以用于求解非对称、非正定矩阵方程组，1.26版本中只支持实数矩阵。
5. MUMPS 为直接法求解器，可以用于求解对称正定，或非对称，或非正定的矩阵方程组，该方法求解效率较高。如果使用迭代法求解时无法收敛，请改为使用直接法 MUMPS。
6. PARDISO 为直接法求解器，可以用于求解对称正定，或非对称，或非正定的稀疏矩阵方程组。

9.3. 时域/频域问题参数设置

如果是时域问题，需要在 Solver setup->Transient/Frequency 界面设置时间步长（默认设置为 0.1s）、时间迭代步数（默认设置为 1 步）、初始时刻（默认设置为 0）。

如果是频域问题，需要在 Solver setup->Transient/Frequency 界面设置频率，频率默认设置为 50Hz。

Solver setup

Solver Transient/Frequency

Transient

Time increment 1.000000e-01

Time steps 1

Initial time 0.000000e+00

Frequency

Frequency 50.00 Hz

OK Cancel

Solver setup Transient/Frequency 界面

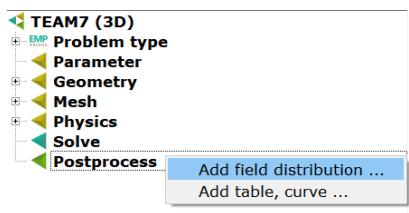
10. 后处理设置（Postprocess）

利用 EMPbridge 软件平台的后处理功能可以方便地对求解结果进行数据可视化分析。后处理支持显示 2D 和 3D 模型的云图和矢量图、支持生成等位线图、支持生成力学形变图、支持绘制曲线与表格、也支持在选定的参数变化范围内生成场图（云图、矢量图、等位线图）的动画。在场图显示时，后处理支持选择特定几何区域进行绘制，同时支持对3维几何体做切面显示、对2维几何面做切线显示。此外，后处理支持在原始求解数据的基础上进行二次计算，支持体积分得到体电荷、能量、损耗等参数，支持截面积分计算以求得电流、磁通、电通量等参数。下面将分四部分进行说明，分别介绍：场图显示、曲线与表格显示、动画显示和积分计算部分的界面与设置。

10.1. 二维场图

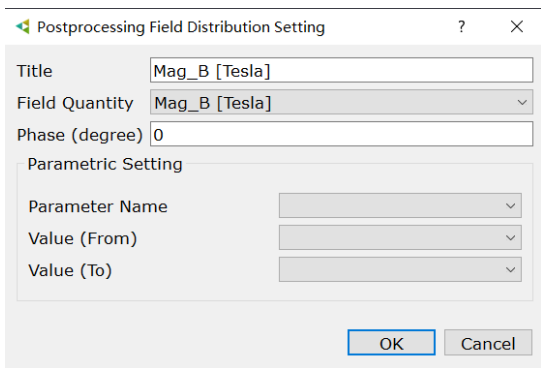
10.1.1. 二维场图绘制设置

右键单击工程树上的 Postprocess 选项，在弹出菜单中选择 Add field distribution 以绘制场图：



绘制场图

在弹出窗口中设置需要绘制的场图信息。

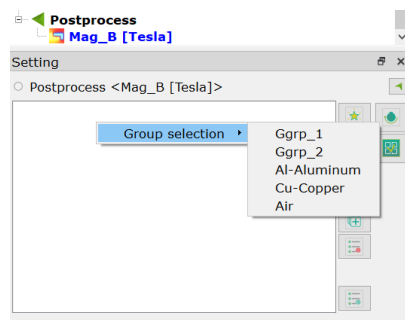


设置场图绘制选项

- Title： 给定后处理窗口的名称，此名称将显示在工程树postprocess结点的子项中，用来区分不同的后处理显示结果。
- Field Quantity： 在下拉列表中选择希望绘制的场量。
- Parametric Setting： 设置参数的变化范围，生成场图动画，具体设置将在[12.1.8节](#)动画显示中进行说明。

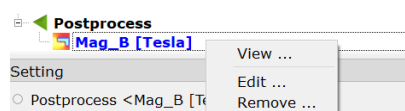
10.1.2. 二维场图绘制几何区域的选择

鼠标左键点击添加的后处理子项，然后在工程树下方的 Setting 窗口中选择希望绘制的几何区域。可以利用右键弹出的下拉菜单由几何分组选择几何体，也可以利用材料分组进行选择。同样，此处支持鼠标点选几何和输入编号选取几何。



选取需要绘制的几何区域

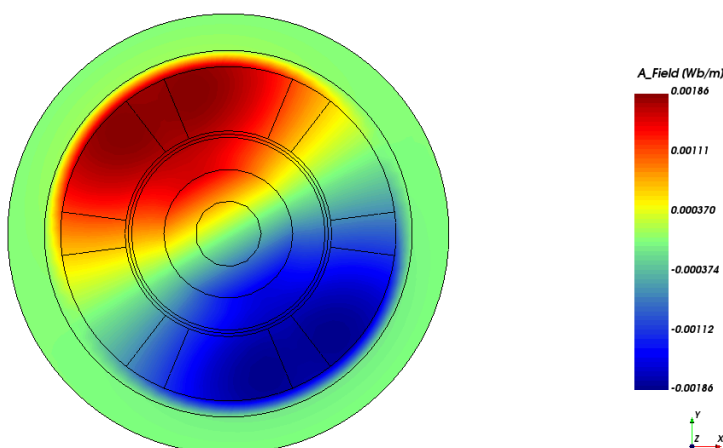
选择完毕后右键点击需要绘制的子项结点，点击View即可观察场图显示结果。



显示场图结果

10.1.3. 云图

以案例库中TEAM problem 30a 感应电机为例生成磁矢位A的云图：



云图显示结果

云图显示支持用户交互操作，长按鼠标左键并拖动鼠标可以改变视角，长按鼠标右键并拖动鼠标（或者利用鼠标滚轴）可以放大/缩小显示结果，长按鼠标滚轴键并拖动鼠标可以进行平移。同时右下角有一个3维指示坐标系用于标明模型的朝向。

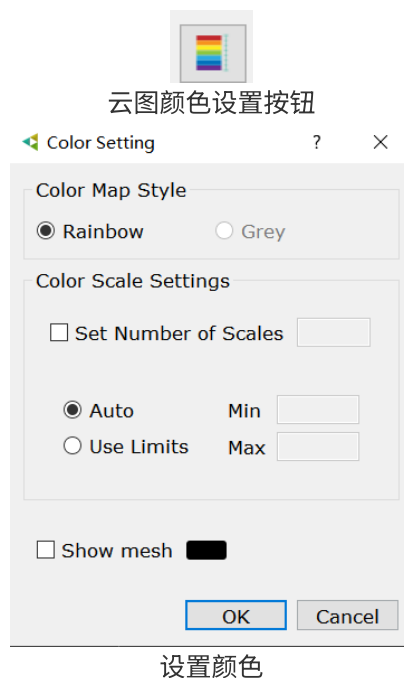
在右侧的颜色条给出云图颜色和数值的对应关系，颜色条上方标题给出了绘制场量的名称和单位。

在显示区域上方的一排按钮用于设置场显示效果，从左到右依次为：颜色条设置，矢量箭头设置，张量显示，等位线设置，力学形变图设置，切面设置，提取路径上数据（1.26 版暂不支持），网格节点数据查看（1.26 版暂不支持），动画播放设置，保存场图图片，背景颜色设置（1.26版暂不支持）。



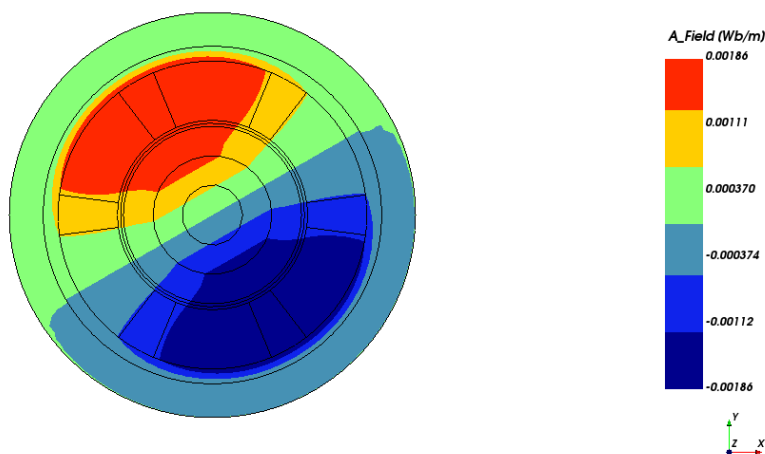
设置场显示效果按钮

点击颜色条设置按钮，弹出云图颜色设置对话框：



设置颜色

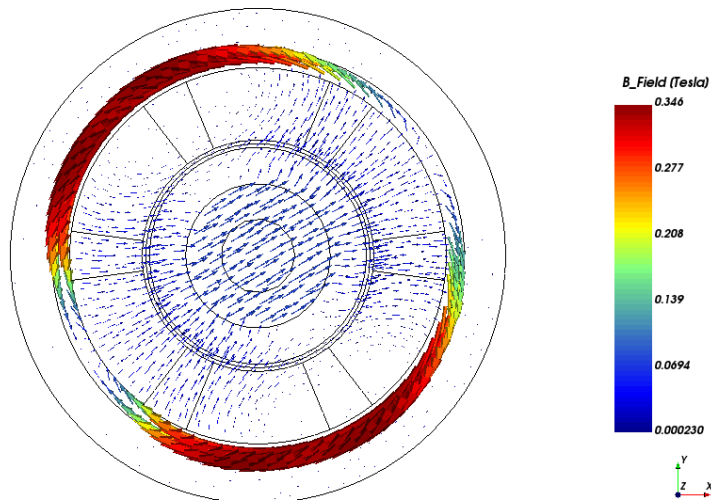
设置 Number of scales 为某整数值，将改变颜色区域的个数，默认值为 128。设置 Min/Max 将改变绘制的数值范围（大于最大值的区域一律为红色，小于最小值的区域一律为蓝色）。此外，勾选 Show Mesh 选项可以同时显示网格分布情况。下图为令 Number of scales = 6 的显示效果：



改变颜色设置后显示效果

10.1.4. 矢量图

以案例库中TEAM problem 30a 感应电机为例生成磁感应强度B的矢量图显示结果：



矢量图显示效果

点击矢量箭头设置按钮，弹出如下对话框：



矢量箭头设置按钮

Vector Plot Settings

Arrow Color Scale Settings

☒ Set Number of Scales 128

☐ Auto Min: 0.00023

☒ Use Limits Max: 0.346

☐ Show mesh

Arrow Density

☒ Show all arrows

☐ Masking arrows

Maximum number of arrows: 5000

Arrow Scale

Type: ☒ Arrow ☐ Cone

☒ Scale by vector magnitude

☐ Set Scale Factor (Default=1.0) 3

OK Cancel

矢量箭头设置对话框

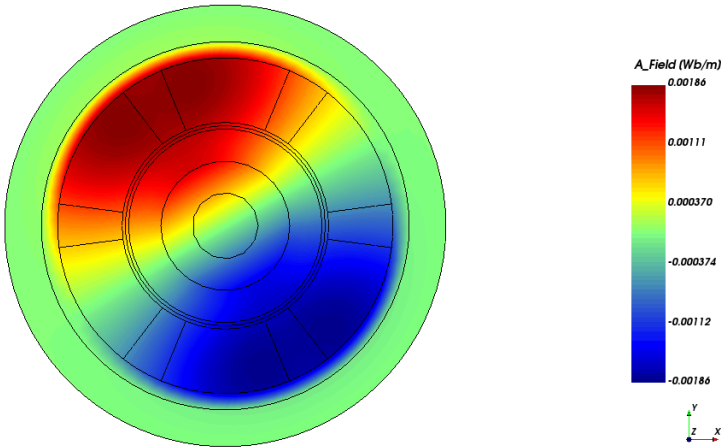
关于颜色和网格显示的设置与[12.1.3节](#)中云图显示设置相同。

在Arrow Density部分，通过选择Masking Arrows，可以设置最多显示的矢量箭头数量，避免网格剖分密集时过度显示箭头导致的视图混乱和加载缓慢问题。

在Arrow Scale部分，勾选Scale by vector magnitude，则根据矢量的模值的大小确定箭头的长短，否则箭头长度将保持一致。通过设置 Scale Factor 可以改变箭头长度，此处为相对值，默认值为1。

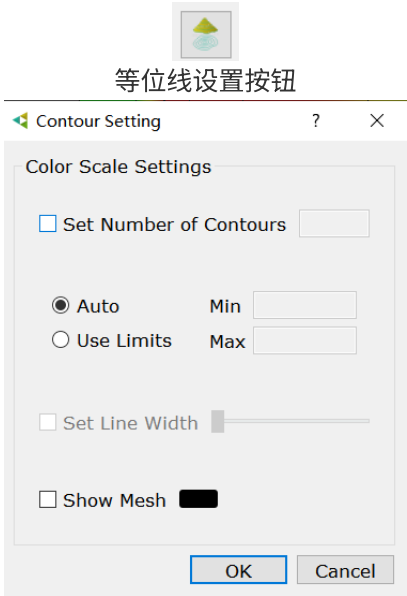
10.1.5. 等位线图

后处理支持由2D云图生成等位线。首先需要绘制2D云图，此处以案例库中TEAM problem 30a 感应电机为例生成磁矢位A的云图：



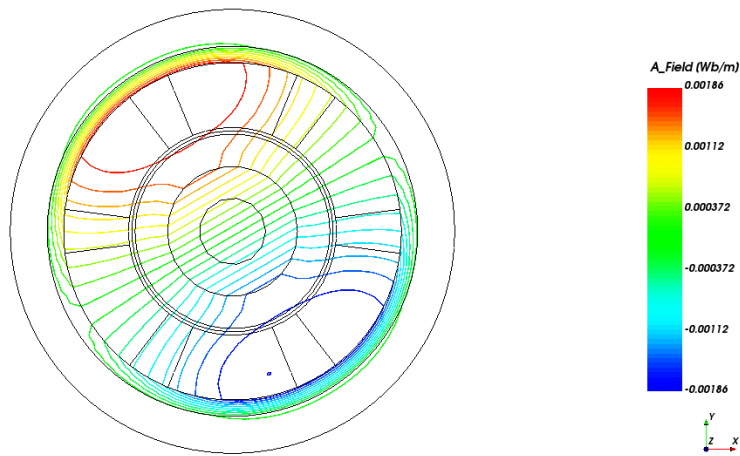
2D云图显示

点击工具栏等位线设置按钮弹出等位线图设置对话框：



等位线图设置对话框

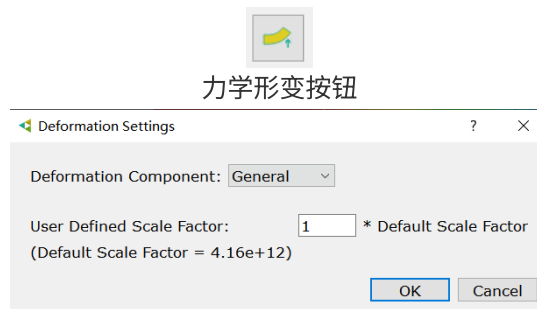
通过设置 Number of Contours 指定等位线的条数，默认显示20条。设置Min/Max来指定绘制的数值范围。保持默认设置的等位线显示效果：



等位线图显示效果

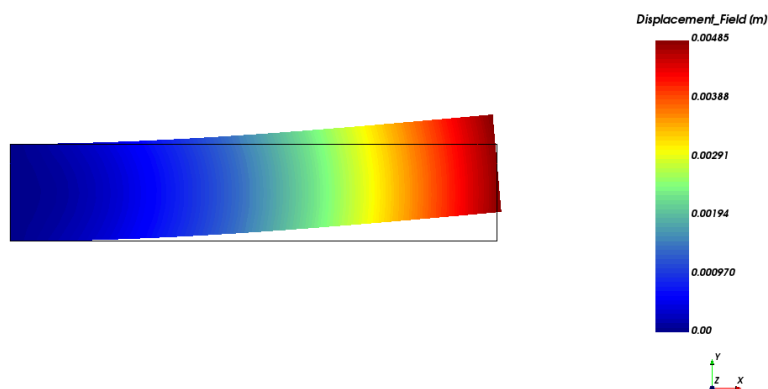
10.1.6 力学形变图

在 Field Quantity 中选择 Displacement Field 绘制力学形变图。通过点击工具栏上力学形变按钮弹出力学形变设置对话框：



力学形变图设置

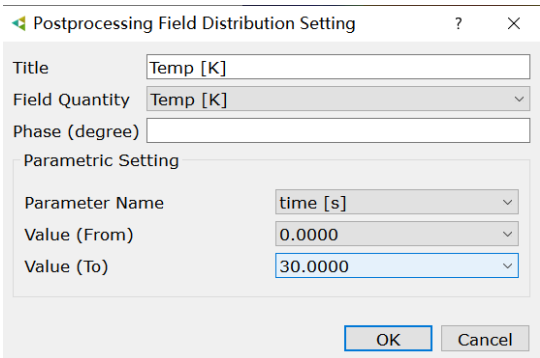
通过 deformation component 下拉菜单选择绘制的形变分量，选择 general 为总体形变（模值），也可以选择 x, y, z 方向的形变分量。设置 scale factor 可以设置形变放大系数，放大系数采用相对值，默认为1。在最下方显示放大系数的默认值，此默认值根据模型尺寸和形变量的最大值自动计算。调节形变放大系数到适当值后的力学形变图：



力学形变图显示

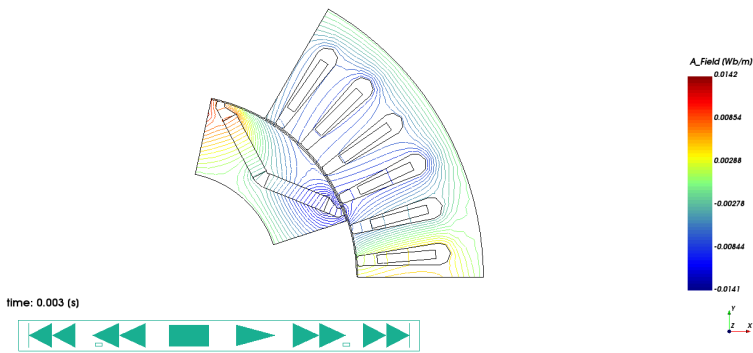
10.1.7 动画显示

后处理支持生成场图的动画，在Add Field distribution弹出的场图绘制设置对话框中，如不设置parametric setting则默认显示单场，一旦设置parametric setting并给定参数变化范围则自动生成场图动画。例如，绘制磁矢位云图分布，并给定变化的时间范围：



设置场图参数变化范围

生成动画的显示如下：



动画显示

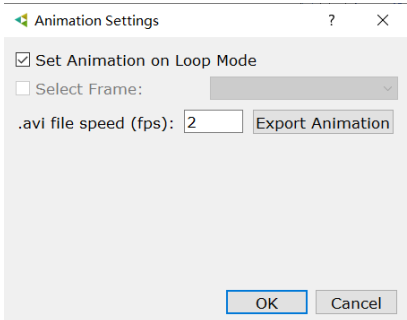
左下角为动画播放控制器，在动画播放的过程中控制播放的行为，从左到右的按钮功能依次为：跳转到第一帧，倒退一帧，暂停，播放/继续播放，前进一帧，跳转到最后一帧。

在动画播放器上方，由文字标注显示参数的名称，当前帧对应的参数值以及参数的单位。在播放的过程中，此参数值同步变化，动态显示相应帧对应的参数大小。

通过点击工具栏动画播放设置按钮可以设置动画播放行为：



动画播放设置按钮



动画播放设置

选中 Set Animation on Loop 后，动画播放到最后一帧后自动跳回第一帧不断循环播放。当生成动画显示时，默认为循环播放模式。（注意：在切换至其他后处理窗口、关闭后处理窗口或关闭程序时请先停止动画播放。）通过 Select Frame 可以指定跳转到某一帧（暂时未开放）。

通过点击Export Animation可以将动画保存为.avi格式的视频文件，通过设置.avi file speed可以通过设置每秒播放的帧数，控制视频动画播放的快慢程度。在导出.avi视频的同时，动画的各帧将保存为相应的PNG图片文件。

10.2. 三维场图

10.2.1. 三维场图绘制设置

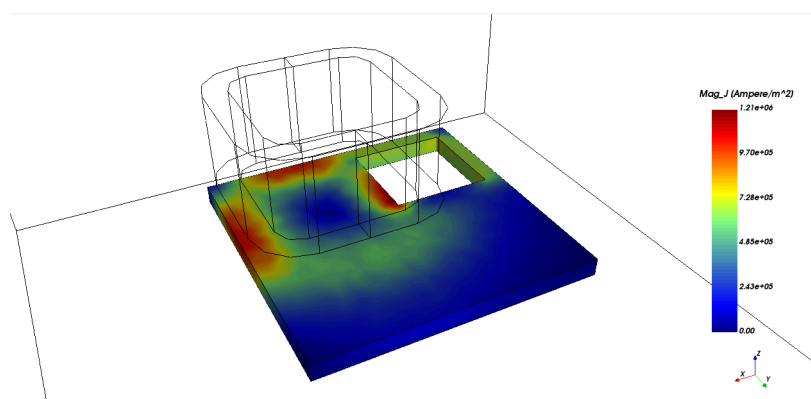
请参照[12.1.1节](#)说明。

10.2.2. 三维场图绘制几何区域的选择

请参照[12.1.2节](#)说明。

10.2.3. 云图

以案例库中TEAM problem 7 带孔铝板感应涡流为例展示线圈和导体板区域的电流密度模值的云图显示结果：

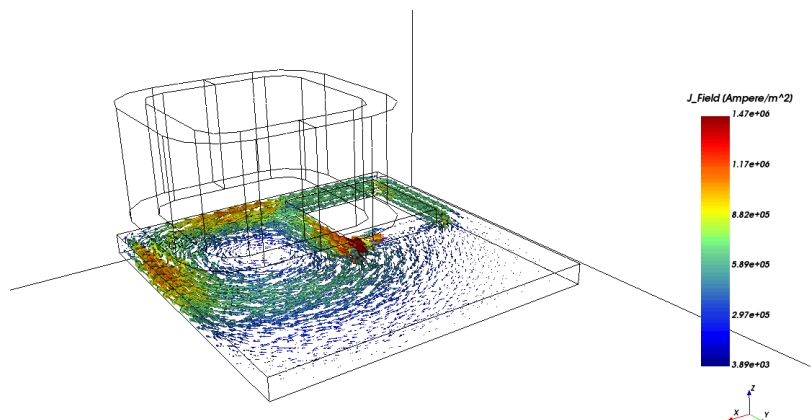


云图显示结果

云图的显示设置请参见[12.1.3节](#)。

10.2.4. 矢量图

以案例库中TEAM problem 7 带孔铝板感应涡流为例展示导体板区域的电流密度的矢量图显示结果：



矢量图显示效果

点击矢量箭头设置按钮，弹出如下对话框：



矢量箭头设置按钮

Vector Plot Settings

Arrow Color Scale Settings

☒ Set Number of Scales 128

☐ Auto Min: 0.00023

☒ Use Limits Max: 0.346

☐ Show mesh

Arrow Density

☒ Show all arrows

☐ Masking arrows

Maximum number of arrows: 5000

Arrow Scale

Type: ☒ Arrow ☐ Cone

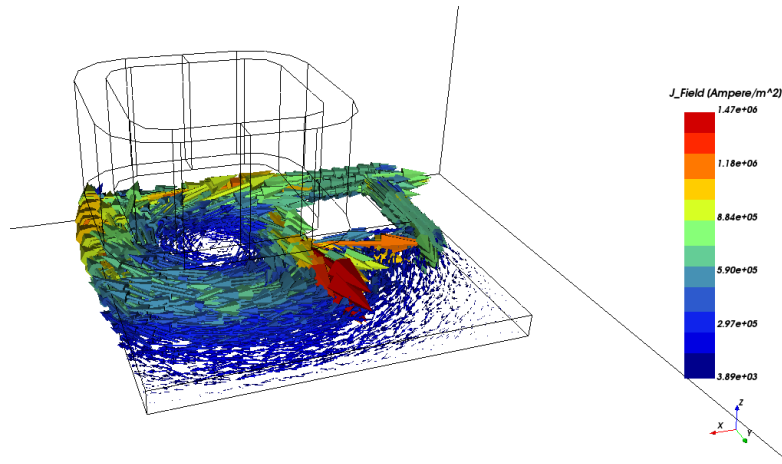
☒ Scale by vector magnitude

☐ Set Scale Factor (Default=1.0) 3

OK Cancel

矢量箭头设置

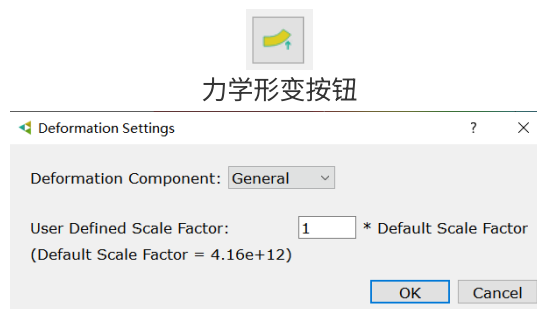
关于颜色和网格显示的设置与[12.2.3节](#)中云图显示设置相同。通过设置 Scale Factor 可以改变箭头长度，此处为相对值，默认值为1。改变 Scale Factor 为3（箭头长度为原来三倍）后的显示效果：



改变矢量箭头长度后显示效果

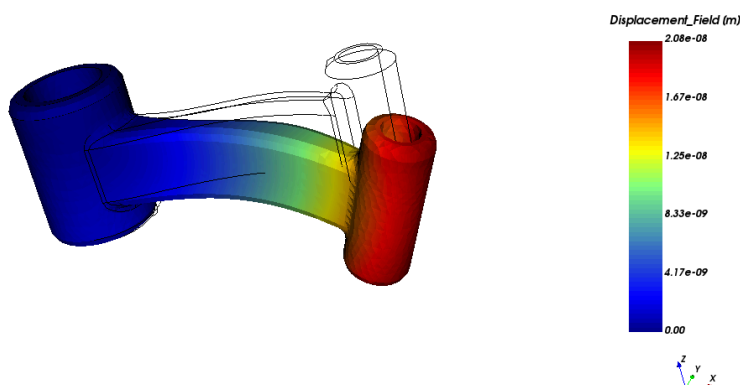
10.2.5. 力学形变图

在 Field Quantity 中选择 Displacement Field 绘制力学形变图。可以通过点击工具栏左数第4个按钮弹出力学形变设置对话框设置形变放大系数：



力学形变图设置

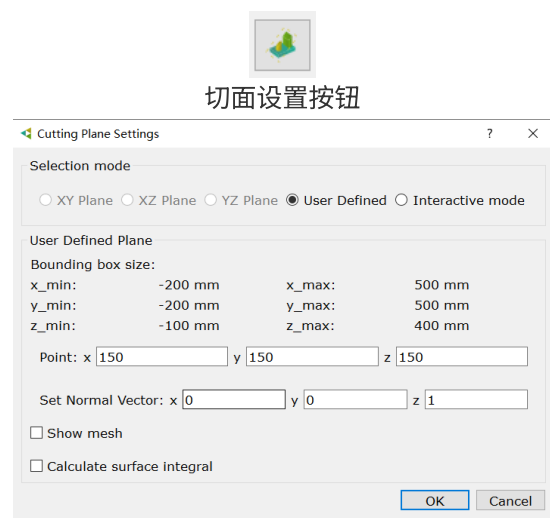
通过deformation component下拉菜单选择绘制的形变分量，选择general为总体形变，也可以选择x, y, z方向的形变分量。设置 scale factor 可以设置形变放大系数，放大系数采用相对值，默认为1。在最下方显示放大系数的默认值，此默认值根据模型尺寸和形变量的最大值自动计算。调节形变放大系数到适当值后的力学形变图：



力学形变图显示

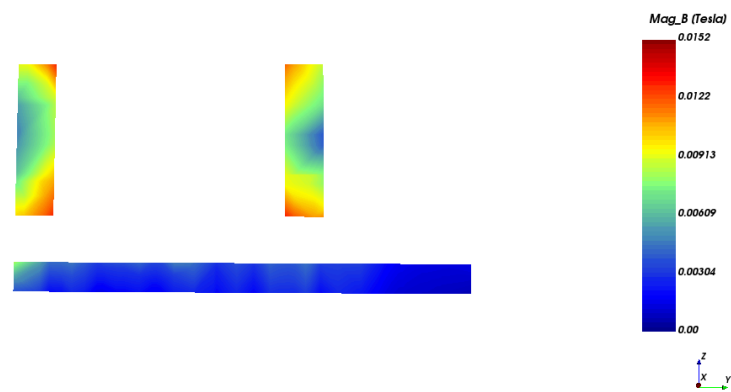
10.2.6. 切面图

点击工具栏切面按钮弹出切面设置对话框：



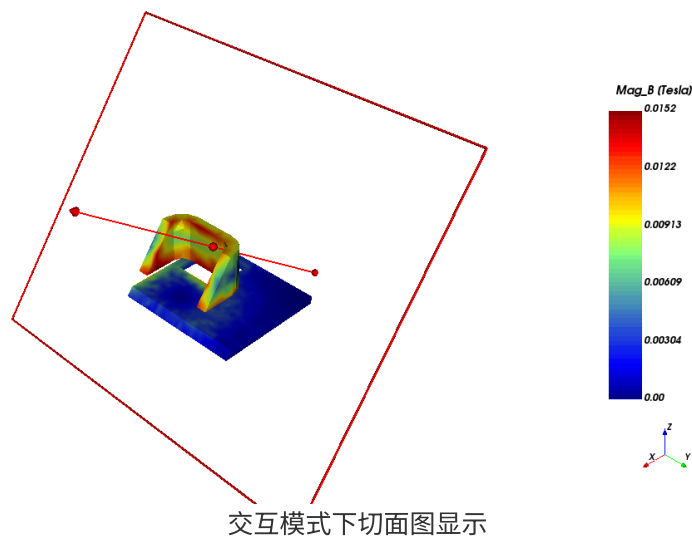
切面设置对话框

Bounding Box Size 给出了模型的包围盒尺寸大小，即模型 x, y, z 方向最长处的尺寸坐标。选择User Defined需要用户给定切面的位置，即通过设置切面上一点的坐标（Point 的坐标）和切面的法向量（Normal Vector）来决定切面的位置。值得注意的是，当用户设置的切面与几何体没有相交时，屏幕输出可能为一片空白，此时用户需要确认切面的设置是否正确，或者改用Interactive mode进行交互式切面设置。设置完毕后，点击确定可以生成切面，显示效果如下图所示。



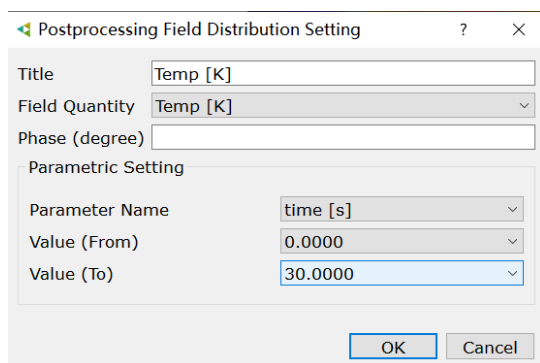
用户自定义模式下切面图显示

选择Interactive mode可以支持用户交互操作，鼠标悬停在切面上，则方向箭头由白变红，切换到备选模式，长按左键进行拖动可以沿切面法向量方向改变切面的位置，长按左键拖动红色箭头，可以改变切面法向量的指向。默认切除切面法向量一侧的几何体，保留切面法向量反向侧的几何体：

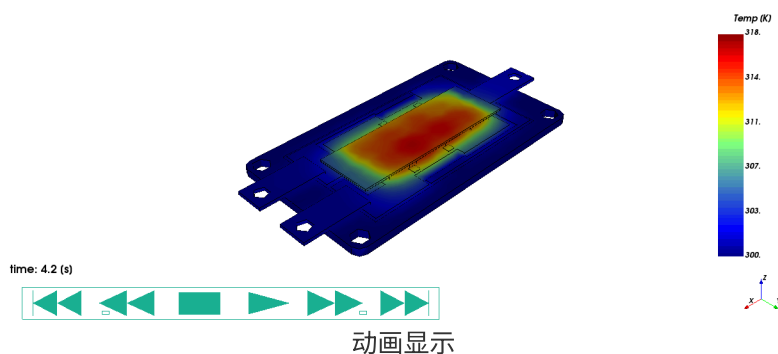


10.2.7. 动画显示

后处理支持生成场图的动画，在Add Field distribution弹出的场图绘制设置对话框中，如不设置parametric setting则默认显示单场，一旦设置parametric setting并给定参数变化范围则自动生成场图动画。例如，绘制磁矢位云图分布，并给定变化的时间范围：



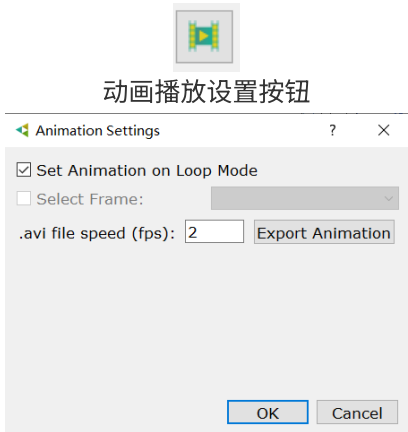
生成动画的显示如下：



左下角为动画播放控制器，在动画播放的过程中控制播放的行为，从左到右的按钮功能依次为：跳转到第一帧，倒退一帧，暂停，播放/继续播放，前进一帧，跳转到最后一帧。

在动画播放器上方，由文字标注显示参数的名称、当前帧对应的参数值以及参数的单位。在播放的过程中，此参数值同步变化，动态显示相应帧对应的参数大小。

通过点击工具栏动画播放控制按钮可以设置动画播放行为：



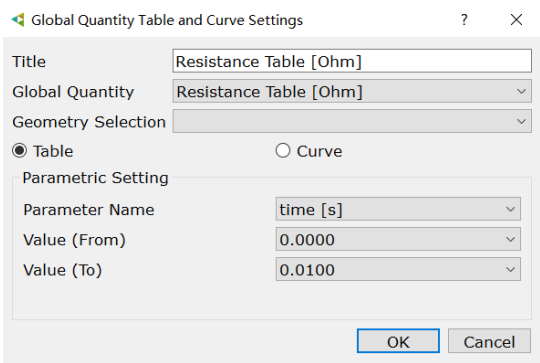
动画播放设置

选中Set Animation on Loop后，动画播放到最后一帧后自动跳回第一帧不断循环播放。当生成动画显示时，默认为循环播放模式。（注意：在切换至其他后处理窗口、关闭后处理窗口或关闭程序时请先停止动画播放。）通过Select Frame可以指定跳转到某一帧（暂未开放）。

通过点击Export Animation可以将动画保存为.avi格式的视频文件，通过设置.avi file speed可以通过设置每秒播放的帧数，控制视频动画播放的快慢程度。在导出.avi视频的同时，动画的各帧将保存为相应的PNG图片文件。

10.3. 曲线与表格

后处理支持生成曲线与表格。右键工程树 Postprocess 选项，选择 Add global evaluation，弹出表格与曲线设置对话框：



曲线与表格绘制设置

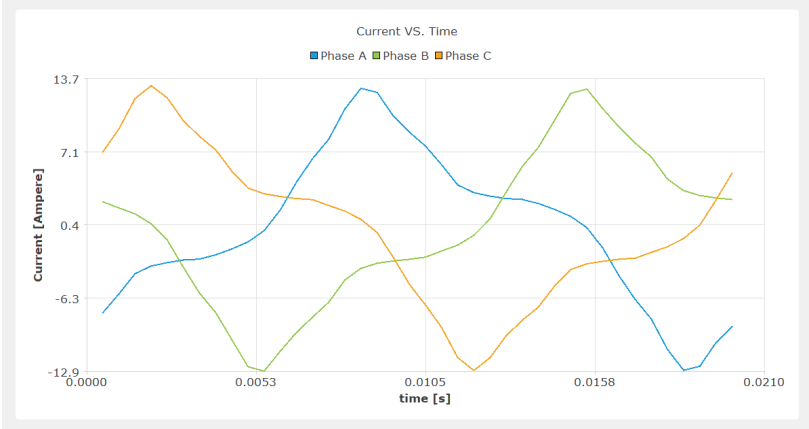
在 Global Quantity 下拉菜单中选择需要绘制的全局量名称。（当选择敏感度分析结果时，需利用 Geometry Selection 决定选择查看哪个部分的敏感度）通过单选框选择绘制表格（table）还是曲线（curve）。对于多参数情况，可以在 parametric setting中选择希望绘制的参数，并设置参数绘制范围。

表格的显示如下：

Capacitance Table				
	Port d [fF]	Port g [fF]	Port s [fF]	Port m [fF]
Port d	0.348247	-0.0860406	-0.012451	-0.0367401
Port g	-0.0860406	0.297749	-0.0881658	-0.019825
Port s	-0.012451	-0.0881658	0.382372	-0.00131143
Port m	-0.0367401	-0.019825	-0.00131138	0.366906

绘制表格

曲线的显示如下（选择时间参数，并给定变化范围）：



绘制曲线

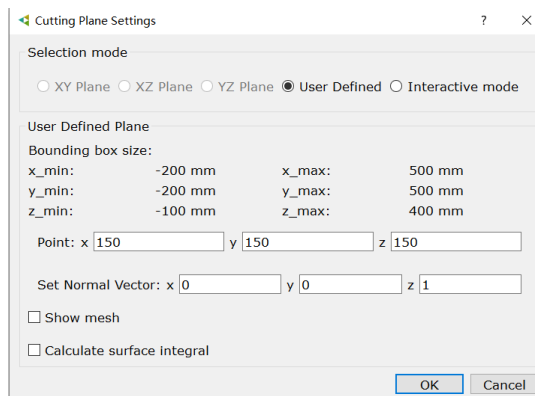
10.4. 全局量输出

10.4.1. 体积分

后处理支持体积分量的输出，其通过通过表格与曲线输出，并利用[10.3节](#)所示的设置窗口中的 Global Quantity 下拉菜单进行选取。平台支持的体积分量包括：总欧姆损耗 (Total_OhmLoss)，能量 (Energy)，转矩 (Torque)，电磁力 (Force)，以及导体交链的磁通（Flux）。

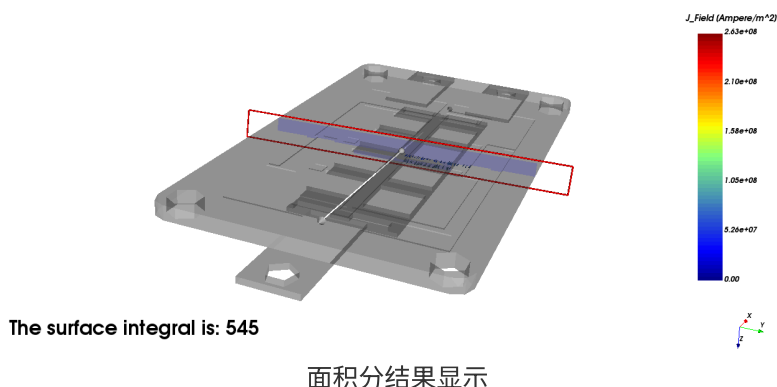
10.4.2. 切面积分

后处理支持用户自定义切面后，在切面上对矢量场进行面积分，从而由电流密度、磁感应强度等场量分布得到电流、磁通等通量大小。在点击切面按钮后，勾选 Calculate surface integral 选项后，进行面积分计算：



面积分设置

面积分的计算结果在后处理显示窗口的右下角由文字标注显示。默认矢量沿切面外法向方向为正，因此积分得到的通量为正则表示沿切面外法向方向流出切面，通量为负则表示沿切面外法向反方向流入切面。同时，切面支持用户的交互操作，用户可以改变切面位置，此时面积分的文字显示同步改变。若要退出切面积分计算模式，则再次点击切面按钮，取消勾选 Calculate surface integral 选项。



面积分结果显示

10.4.3. 等效电容/电感/电阻参数输出

在后处理曲线与表格设置的 Global Quantity 下拉菜单中选取 Capacitance Table, Inductance Table 或 Resistance Table 可以分别生成等效电容/电感/电阻参数的矩阵。

10.4.4. 敏感度分析

在后处理曲线与表格设置的 Global Quantity 下拉菜单中选取 Sensitivity 1st Table，输出敏感度分析结果。1.26 版目前仅支持三维静电场的敏感度分析。

11. 案例库说明

1.26版本案例库中包含 16 个案例，在安装包中的 examples 文件夹中可以找到各案例对应的文件夹，其对应关系如下表所示。案例仿真全过程的操作视频可以在video文件夹中找到，也可以通过点击下表中案例视频名称的链接打开，视频为.mp4格式。

1. 静电场： 集成电路参数提取 (Emp_3dc_extraction_proj) ([3d_capacitance_extraction.mp4](#))
2. 静磁场： 轴对称线圈电感参数提取 (Emp_Axisymmetric_ms_extraction_proj)
3. 恒定电流场： 3端口连接器 (Emp_2dSteadyCurrent_proj) ([dc_3port.mp4](#))
4. 静磁场： 永磁同步电机转动 (Emp_2dMotor_proj) ([ms_PMSM.mp4](#))
5. 参数分析： 感应电机 TEAM problem 30a (Emp_2dParametric_proj) ([2d_qms_parametric_team30.mp4](#))
6. 时域准静磁场： 非线性计算 TEAM problem 21 (Emp_2d_qmst_nonlinear_proj)
7. 静磁场： 变压器非线性计算 TEAM problem 20 (Emp_3dms_team20_proj)
8. 静磁场： 开关磁阻电机转动分析 TEAM problem 24 (Emp_3d_team24_rotation_proj)
9. 频域准静磁场： TEAM problem 7 带孔铝板感应涡流 (Emp_3dteam7Eddy_proj) ([qms-team7Eddy](#))
10. 稳态/瞬态机械场： linkrod受力 (Emp_3dElastostatic_proj) ([3d-elst.mp4](#))
11. 压电材料频域分析： 压电材料振动 (Emp_3dplate_pzef_proj)
12. 模态分析： 电机定子振动 (Emp_3dmodalanalysis)
13. 参数提取： IGBT电阻、电感参数提取 (Emp_3dms_extractionRL_proj)
14. 多场耦合（频域准静磁场-受迫振动） (Emp_2d_mp_qms_fvbr_proj) ([2d-mp-qms-fvbr.mp4](#))
15. 多场耦合（恒定电流场-瞬态热场）： IGBT封装的发热 (Emp_3dMultiphys_sc_hct_proj) ([3d-mp-sc-hct.mp4](#))
16. 多场耦合（静磁场-机械场）： 变压器绕组受力分析 (Emp_3d_ms_elst_transformer_1f2)

12. 附录

12.1. 符号说明

符号	中文名称	英文名称	单位
v	电位	Pontential	V
ϵ	介电常数	Permittivity	
ρ	电荷密度	Charge Density	C/m ³
σ	电导率	Electrical Conductivity	S/m
h	磁场强度	Magnetic Field Intensity	A/m
j	电流密度	Current Density	A/m ²
b	磁感应强度	Magnetic Induction	T
e	电场强度	Electric Field Intensity	N/C
μ	磁导率	Permeability	H/m
λ	热传导系数	Thermal Conductivity	W/(M · K)
T	温度	Temperature	K
Cp	热容	Heat Capacity	J/(Kg · K)
ν	泊松系数	Poisson Coefficient	
E	杨氏模量	Young's Modulus	Pa
f_v	体积力	Volume Force	N/m ³
u	应变	Strain	