

Flux2D 感应加热 技术方案 (1)

北京天源科技有限公司

目 录

1. 问题描述	1
2. 模型描述	1
2.1 模型尺寸	1
2.2 建模	2
2.3 网格	4
2.4 材料设置	5
2.5 物理变量设置	9
2.6 电路搭建	10
2.7 物理区域设置	11
2.8 集肤效应区域的网格设置	14
2.9 网格剖分	16
3. 工况 1	16
3.1 物理设置	16
3.2 计算设置	19
3.3 计算结果	20
3.3.1 计算涡流损耗	20
3.3.2 计算输出功率	21
3.3.3 计算电源电流	22
4. 工况 2	23
4.1 物理设置	23
4.2 计算设置	29
4.3 计算结果	30
4.3.1 功率损耗计算结果	30
4.3.2 瞬态温度计算结果	31
4.3.3 单点温度变化曲线	32

5. 工况 3	34
5.1 物理设置	34
5.2 计算设置	35
5.3 计算结果	36
5.3.1 功率损耗计算结果	36
5.3.2 瞬态温度计算结果	37
5.3.3 单点温度变化曲线	38
5.3.4 计算钢胚上的焦耳热随着时间的变化曲线	38
6. 工况 4	39
6.1 物理设置	40
6.2 计算设置	41
6.3 计算结果	41
6.3.1 瞬态温度计算结果	42
6.3.2 单点温度变化曲线	42

1. 问题描述

本方案描述如何使用 Flux2D 计算钢胚的感应加热问题。此方案包含有一个模型，以及基于这个模型的四个计算工况，分别是：

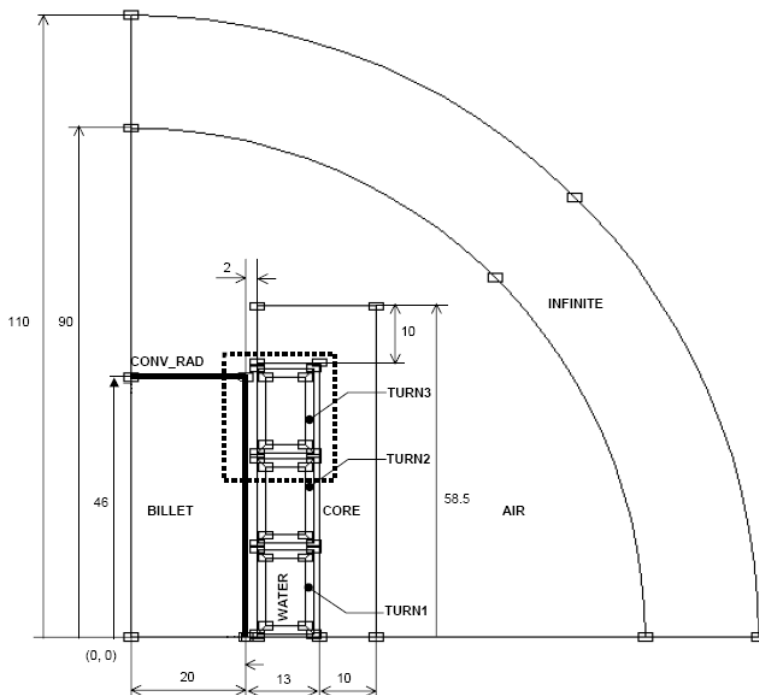
- 1) 根据输入电流计算钢胚上的涡电流和功率损耗。
- 2) 根据涡电流和损耗的电磁功率，计算钢胚上的稳态温度分布，此时不考虑温度场对电磁场的影响，即不考虑钢胚的电磁参数随温度的变化。
- 3) 根据涡电流和损耗的电磁功率，计算钢胚上在 0~4 秒的温度分布。考虑热和电磁的互藕。
- 4) 根据涡电流和损耗的电磁功率，计算钢胚的淬火过程。考虑热和电磁的互藕。

注：此文档是感应加热的方案教程。对 Flux 操作有基础的话，可以根据此文档的介绍复现里面的所有模型以及计算结果。初次接触 Flux 的使用者，请首先到天源官网 www.tianyuantech.com 上下载 Flux 基础学习教程与教学视频。

2. 模型描述

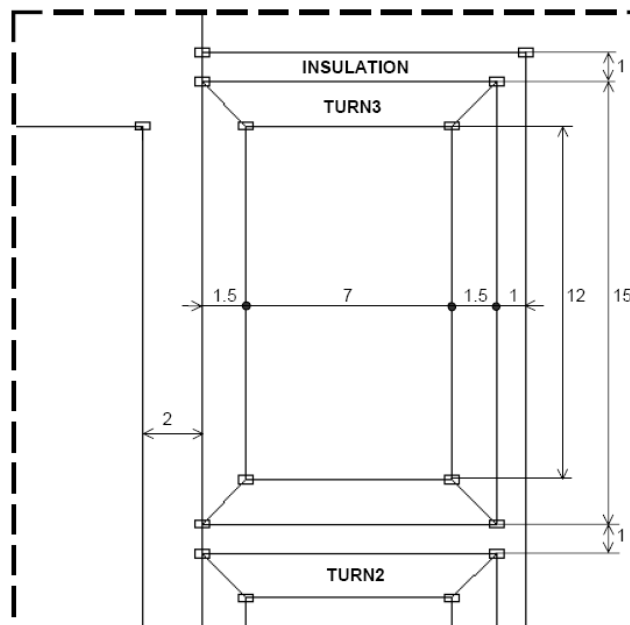
2.1 模型尺寸

下图是模型的外观与几何尺寸（单位：mm）：



模型包含有钢胚 BILLET，线圈 TURN1，TURN2 和 TURN3，铁心 Core，绝缘体 Insulation 以及水 Water，空气 Air 以及保角变换区域 Infinite。

下图是黑色框中的细节尺寸（单位：mm）：



2.2 建模

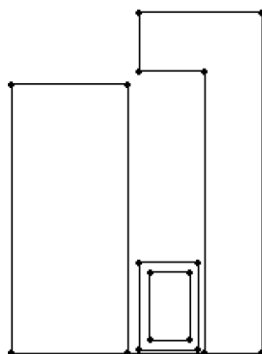
模型的对称设置如下：

Name of Symmetry *	
SymmetryAxis_1	
Comment	
Geometrical type of the symmetry	
Versus X-axis	
Y offset Position of symmetry axis *	0 f()
Physical aspects of the symmetry	
Normal magnetic fields, tangent electric field, adiabatic condition	

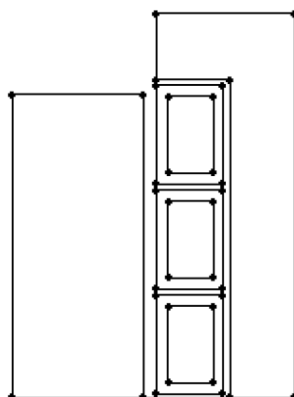
Name of Symmetry *	
SymmetryYaxis_1	
Comment	
Geometrical type of the symmetry	
Versus Y-axis	
X offset Position of symmetry axis *	0 f()
Physical aspects of the symmetry	
Tangent magnetic fields, normal electric field, adiabatic condition	

建模过程如下：

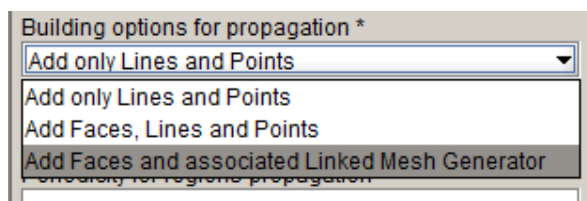
1) 建立基本单元的点 and 线，如下图所示：



2) 通过复制得到第二个和第三个线圈模型：

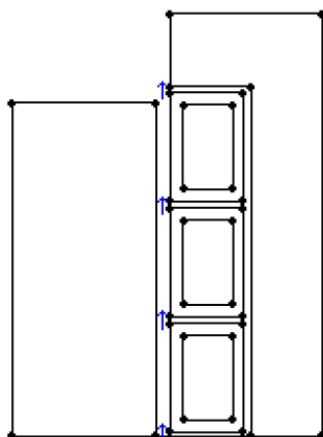


复制的时候，选择 “Add Faces and associated Linked Mesh Generator”：

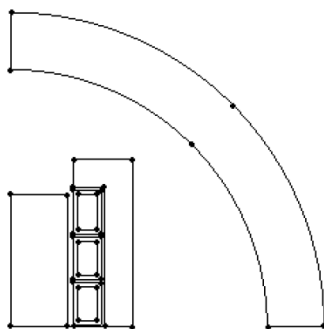


这样方便做网格。

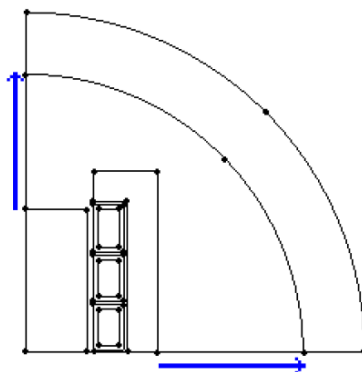
3) 然后再连接下图中的四条线段，得到 Insulation 区域。



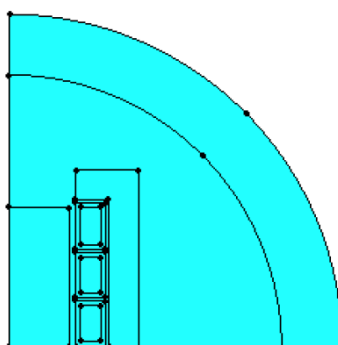
4) 创建 Infinite 区域:



5) 连接如下两条线段



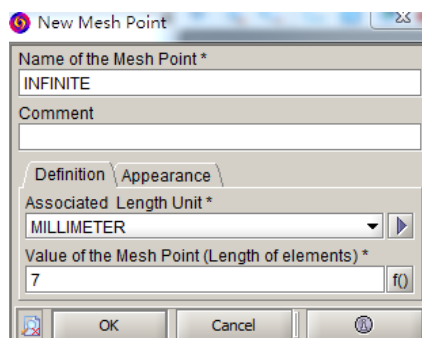
6) 点击 “Build Faces”, 创建面, 如下图。



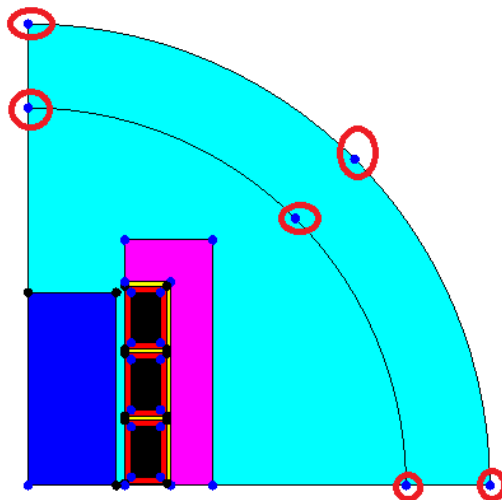
建模结束。

2.3 网格

设置 Infinite 的剖分点:



然后将此剖分点设置给如下的点：



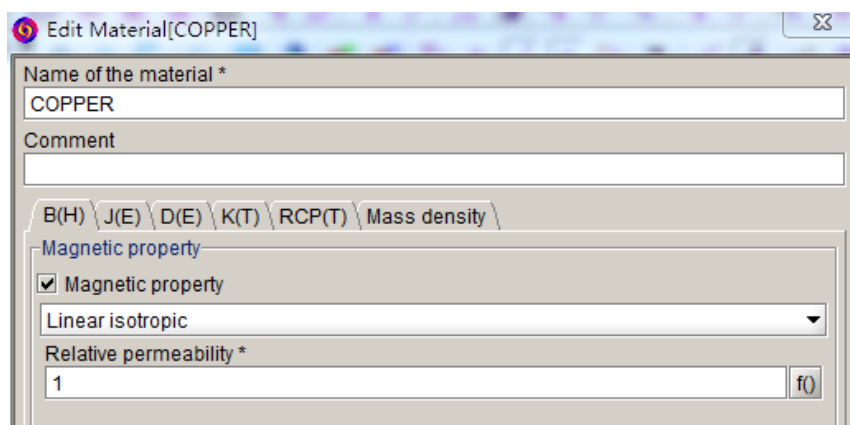
后面还有对集肤效应区域的网格设置，此项放在材料和区域设置后面。

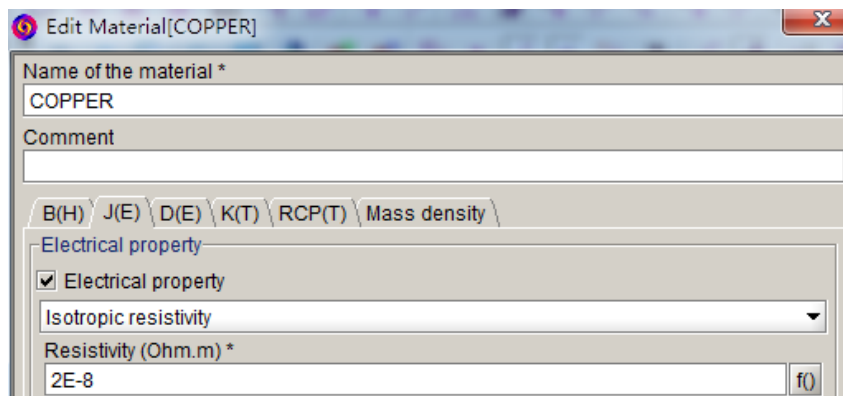
2.4 材料设置

此模型需要三种材料设置，分别是铜、铁氧体（铁芯材料）和钢胚。空气、绝缘体和水对于磁场、涡流分析、温度计算都近似相当于真空。

材料设置部分需要首先完成设置相应的求解模式，例如稳态磁场求解（Steady State AC Magnetic 2D）。如果要设置温度与电磁参数耦合的材料，就必须先设置耦合求解模式，例如 Steady State AC Magnetic 2D Coupled With Transient Thermal 2D，下面只讲述如何设置材料参数。在具体操作过程中，需要分别在四个不同的工况中设定具体的求解模式之后，再设置材料参数。设置求解模式的详细情况在后面的第三、第四、第五和第六部分的内容里。

铜的材料参数如下：





Dialog box titled "Edit Material[COPPER]".

Name of the material *: COPPER

Comment

Tabbed interface: B(H) | J(E) | D(E) | K(T) | RCP(T) | Mass density

Electrical property

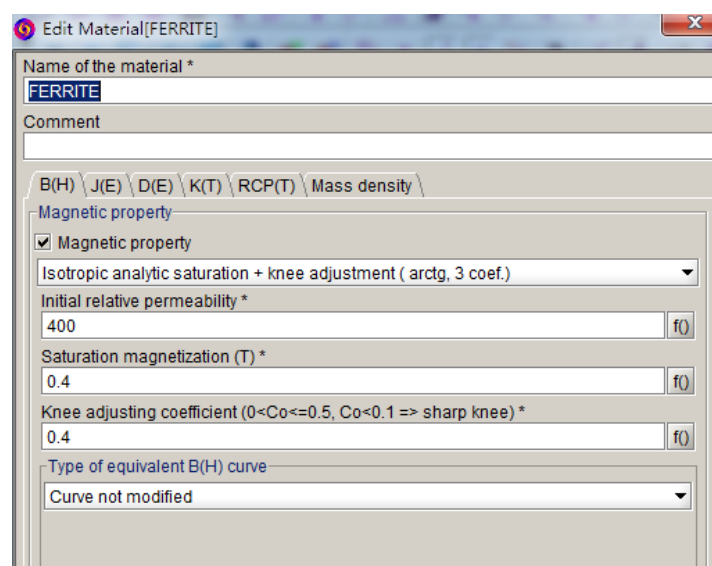
☒ Electrical property

Isotropic resistivity

Resistivity (Ohm.m) *: 2E-8

其他参数默认不修改。

铁氧体材料设置如下：



Dialog box titled "Edit Material[FERRITE]".

Name of the material *: FERRITE

Comment

Tabbed interface: B(H) | J(E) | D(E) | K(T) | RCP(T) | Mass density

Magnetic property

☒ Magnetic property

Isotropic analytic saturation + knee adjustment (arctg, 3 coef.)

Initial relative permeability *: 400

Saturation magnetization (T) *: 0.4

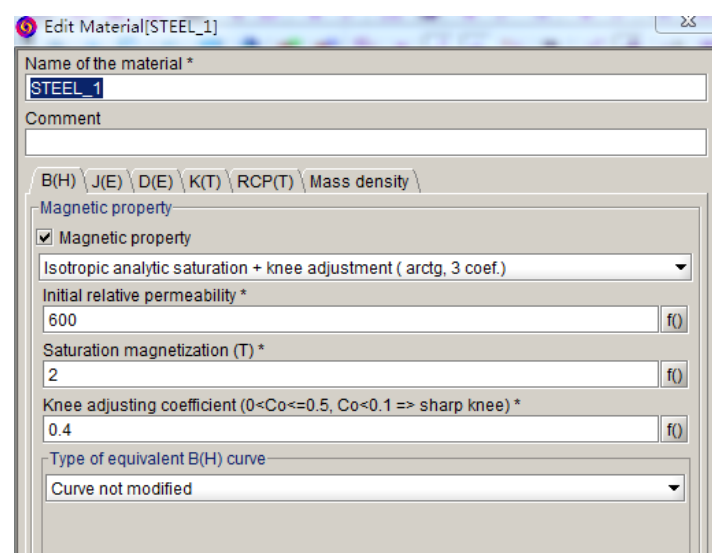
Knee adjusting coefficient (0<Co<=0.5, Co<0.1 => sharp knee) *: 0.4

Type of equivalent B(H) curve

Curve not modified

其他参数默认不修改。

钢胚材料（Steel_1）如下所示：



Dialog box titled "Edit Material[STEEL_1]".

Name of the material *: STEEL_1

Comment

Tabbed interface: B(H) | J(E) | D(E) | K(T) | RCP(T) | Mass density

Magnetic property

☒ Magnetic property

Isotropic analytic saturation + knee adjustment (arctg, 3 coef.)

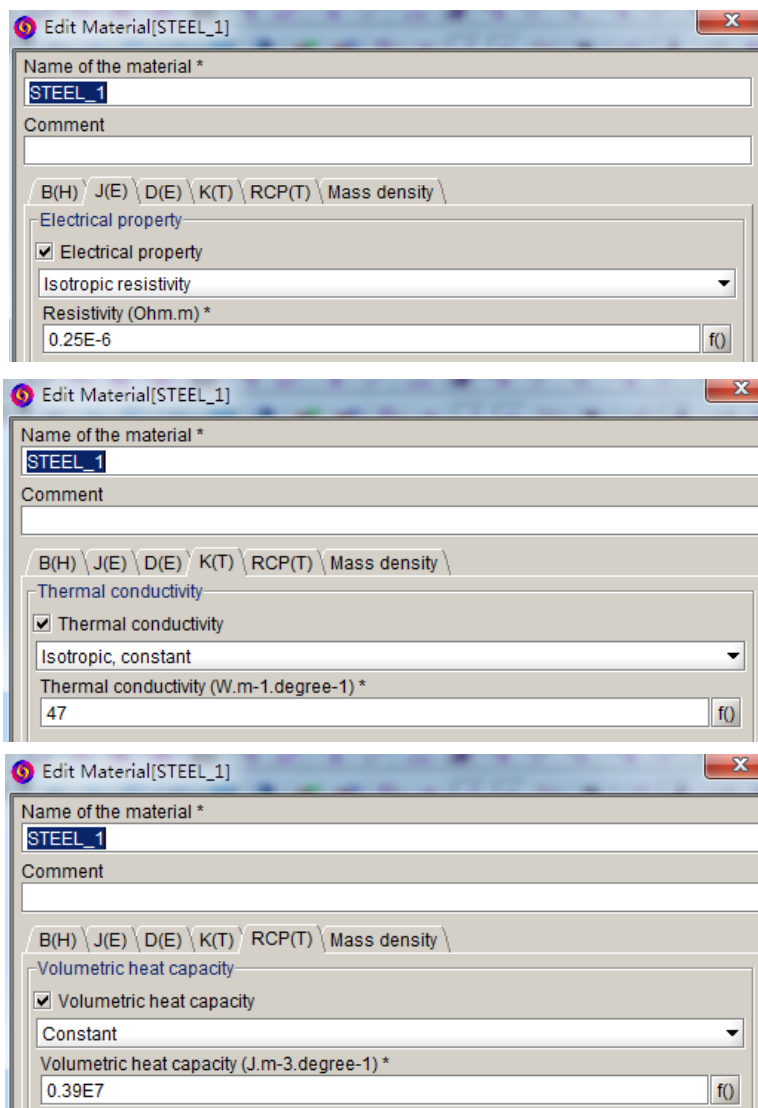
Initial relative permeability *: 600

Saturation magnetization (T) *: 2

Knee adjusting coefficient (0<Co<=0.5, Co<0.1 => sharp knee) *: 0.4

Type of equivalent B(H) curve

Curve not modified



上述设置的钢胚材料用于计算磁场涡流损耗以及根据涡流损耗计算温度场分布。也就是说，温度的变化对材料电磁参数性能的影响不计算在内。因此这样的磁热计算并不是真正的互藕。如果要计算磁场和温度场的多物理耦合 (Multi-physics)，需要按下述设置 (Steel_2)：

Edit Material[STEEL_2]

Name of the material *
STEEL_2

Comment

B(H) \ J(E) \ D(E) \ K(T) \ RCP(T) \ Mass density \

Magnetic property

☒ Magnetic property

Isotropic analytic saturation + knee adjustment * exponential function of T

Saturation magnetization (T) *
2.0 f()

Initial relative permeability *
600 f()

Knee adjusting coefficient ($0 < Co \leq 0.5$, $Co < 0.1 \Rightarrow$ sharp knee) *
0.4 f()

Temperature constant

Temperature value *
40 f()

unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Curie temperature

Temperature value *
760 f()

unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Default working temperature

Temperature value *
20 f()

unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Name of the material *
STEEL_2

Comment

B(H) \ J(E) \ D(E) \ K(T) \ RCP(T) \ Mass density \

Electrical property

☒ Electrical property

Isotropic resistivity, linear function of T

a (degree-1) in $\rho(T) = \rho_0 (1 + a(T-T_0))$ *
4E-3 f()

ρ_0 (Ohm.m) in $\rho(T) = \rho_0 (1 + a(T-T_0))$ *
2.5E-7 f()

T0 (reference temperature) in $\rho(T) = \rho_0 (1 + a(T-T_0))$

Temperature value *
0 f()

unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Default working temperature

Temperature value *
20 f()

unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Name of the material *
STEEL_2
Comment

B(H) J(E) D(E) K(T) RCP(T) Mass density
Thermal conductivity
☒ Thermal conductivity
Isotropic, linear function of T
a (degree-1) of formula $K(T) = K_a (1 + a(T-T_0))$ *
-0.25E-3 f()
Ka (W.m-1.degree-1) of formula $K(T) = K_a (1 + a(T-T_0))$ *
47 f()
T0 (reference temperature) of formula $K(T) = K_a (1 + a(T-T_0))$ —
Temperature value *
0 f()
unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Name of the material *
STEEL_2
Comment

B(H) J(E) D(E) K(T) RCP(T) Mass density
Volumetric heat capacity
☒ Volumetric heat capacity
Gaussian function of T + exponential
Energy of phase transition (J.m3) *
0.12E10 f()
RCpo (J.m-3.degree-1) in $RCp(T) = RCpi + (RCpo-RCpi) \exp(-T/Tau) + RCpGauss(T)$ *
0.39E7 f()
RCpi (J.m-3.degree-1) in $RCp(T) = RCpi + (RCpo-RCpi) \exp(-T/Tau) + RCpGauss(T)$ *
0.468E7 f()
Gaussian standard deviation (degree) *
30 f()
Tau in $RCp(T) = RCpi + (RCpo-RCpi) \exp(-T/Tau) + RCpGauss(T)$ —
Temperature value *
500 f()
unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE
Temperature of phase transition
Temperature value *
760 f()
unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

在温度场计算部分，除了钢胚之外，其他部分都不参与热计算，因此不设定热力参数，在钢胚表面设置对流边界，确定热求解区域的边界条件。

2.5 物理变量设置

把频率和输入电压作为变量，在 Parameter I/O 中设置：

Name of the Physical parameter *

FRE

Comment

Definition Property

Type of Physical parameter

Parameter controlled via a scenario

Reference value *

50000.0

Geometric parameter

Name of the Physical parameter *

VOLTAGE

Comment

Definition Property

Type of Physical parameter

Parameter controlled via a scenario

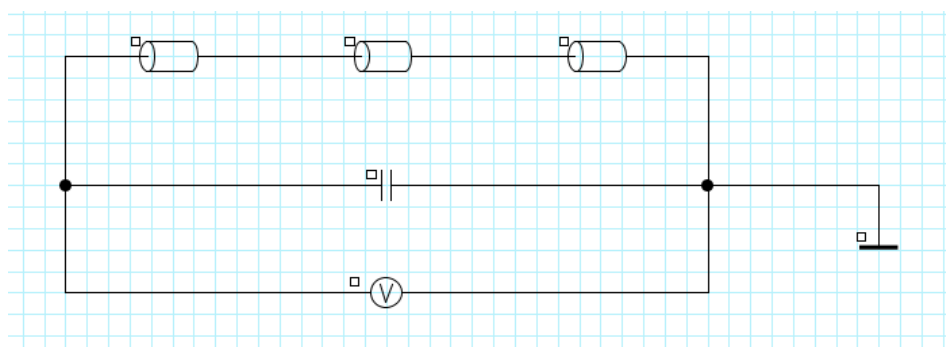
Reference value *

120.0

Geometric parameter

2.6 电路搭建

模型的三个铜电导体在下述电路中：



电压源设置如下图所示：

Voltage source name *

VSOURCE

Comment

Model Terminals Appearance Evaluated information

Voltage source type

Voltage source by formula (Volt)

rms value (V) *

VOLTAGE f()

Phase (degree) *

0 f()

电容设置为 25 微法:

Capacitor name *

CAPACITOR

Comment

Model Terminals Appearance Evaluated information

Capacitance (Farad) *

25E-6 f()

三个导体的设置:

Solid conductor 2 terminals name *

TURN1

Comment

Property Terminals Appearance Evaluated information

Symetries and periodicities : conductors in series or in parallel

All the symmetrical and periodical conductors are in series

Solid conductor 2 terminals name *

TURN2

Comment

Property Terminals Appearance Evaluated information

Symetries and periodicities : conductors in series or in parallel

All the symmetrical and periodical conductors are in series

Solid conductor 2 terminals name *

TURN3

Comment

Property Terminals Appearance Evaluated information

Symetries and periodicities : conductors in series or in parallel

All the symmetrical and periodical conductors are in series

2.7 物理区域设置

下面设置物理区域 (Line Region 和 Surface Region)。在设置求解模式之前, 区域设置对话框都是只有外观设置选项。

如下图空气区域:

Name of the region *

AIR

Comment

Appearance Evaluated information

Color *

Turquoise

Visibility *

VISIBLE

Infinite 区域:

Name of the region *	
INFINITE	
Comment	
Infinite region	
Appearance	Evaluated information
Color *	
Yellow	▶
Visibility *	
INVISIBLE	▼

钢胚区域:

Name of the region *	
BILLET	
Comment	
Appearance	Evaluated information
Color *	
Cyan	▶
Visibility *	
VISIBLE	▼

铁心区域:

Name of the region *	
CORE	
Comment	
Appearance	Evaluated information
Color *	
Magenta	▶
Visibility *	
VISIBLE	▼

绝缘体区域:

Name of the region *	
INSULATION	
Comment	
Appearance	Evaluated information
Color *	
Yellow	▶
Visibility *	
VISIBLE	▼

三个线圈区域:

Name of the region *	
TURN1	
Comment	
Appearance	Evaluated information
Color *	
Red	▶
Visibility *	
VISIBLE	▼

Name of the region *
TURN2

Comment

Appearance / Evaluated information

Color *
Red

Visibility *
VISIBLE

Name of the region *
TURN3

Comment

Appearance / Evaluated information

Color *
Red

Visibility *
VISIBLE

冷却水区域:

Name of the region *
WATER

Comment

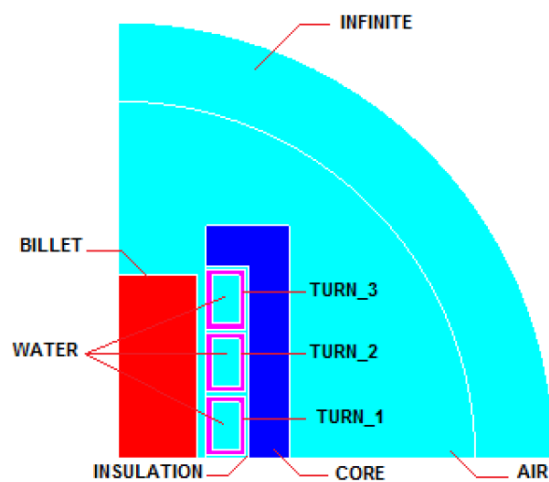
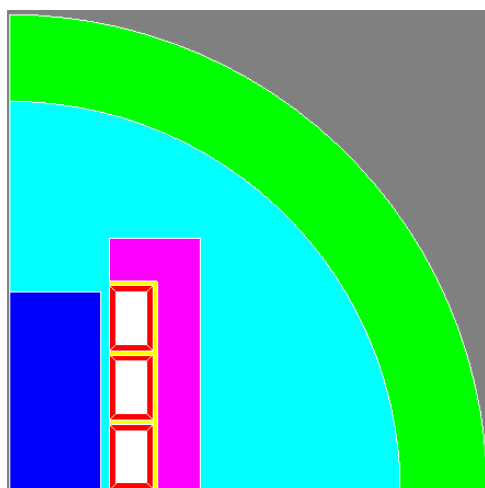
Appearance / Evaluated information

Color *
White

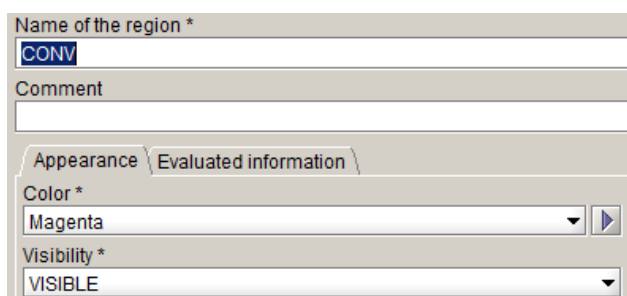
Visibility *
VISIBLE

设置给如下模型，颜色对应为:

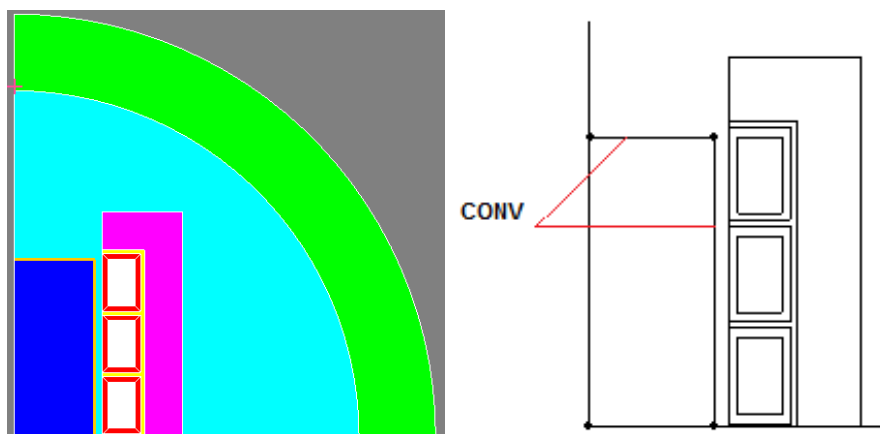
区域	对应颜色	区域	对应颜色
冷却水(WATER)	白色	TURN1	红色
绝缘体	黄色	TURN2	红色
铁心	紫色	TURN3	红色
空气	天蓝色	Infinite	绿色
钢胚	深蓝色		



温度交换边界（Line Region）：



设置给钢胚边界（棕色线段）：



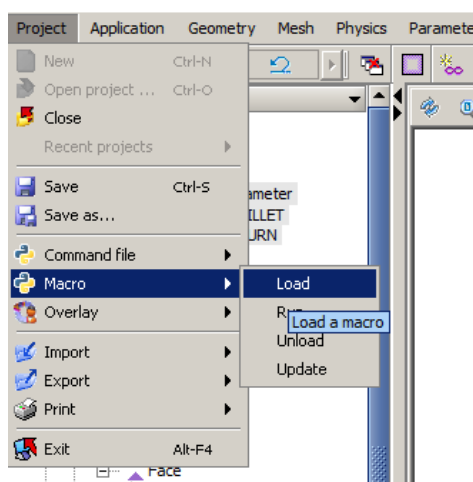
2.8 集肤效应区域的网格设置

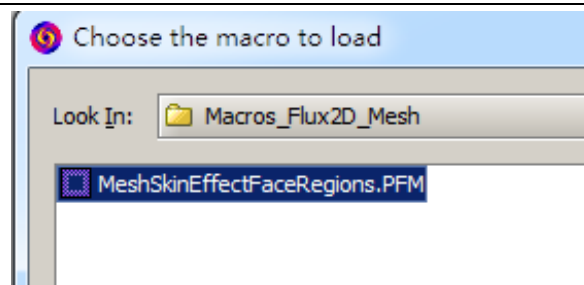
使用 Flux Supervisor 的 Skin Depth 计算金属的趋肤深度。本案例将要使用的导电材料分别为：

- 1) 铜导体，磁导率=1，电阻率=2e-8；
- 2) 钢胚，初始磁导率=600，电阻率=2.5e-7

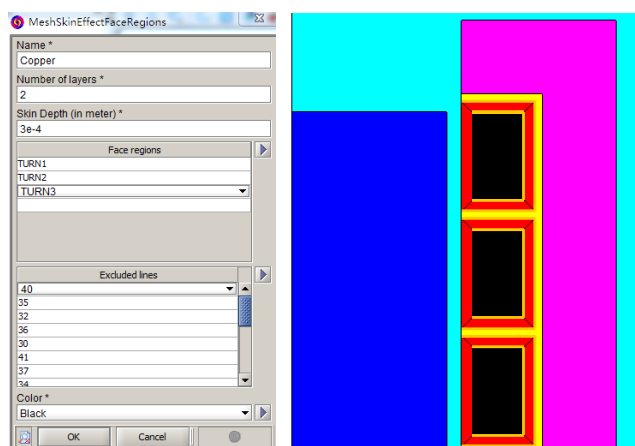
经计算得到铜的趋肤深度为 0.3mm，钢胚的趋肤深度为 4.59e-2mm。

使用 Flux2D 的宏：

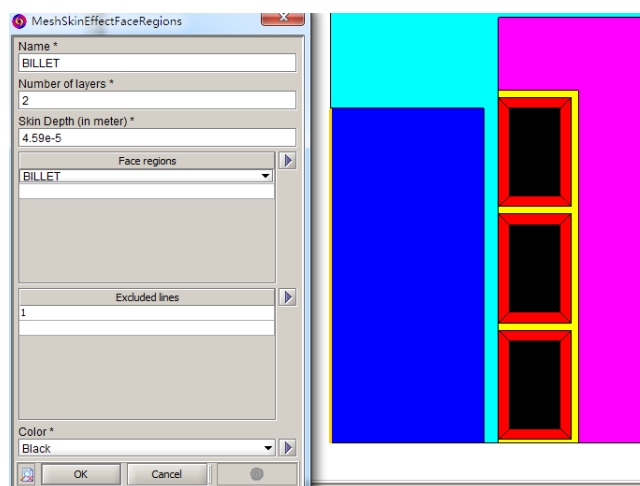




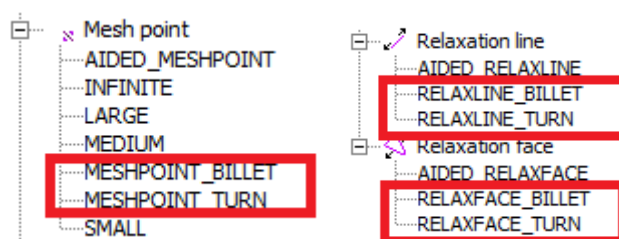
然后 Run Macro，选择三个线圈区域“TURN1”，“TURN2”和“TURN3”，设置铜导体集肤深度参数如下，注意设置“Excluded Lines”：



选择钢胚区域（BILLET），设置钢胚集肤深度参数如下，注意设置“Excluded Lines”：

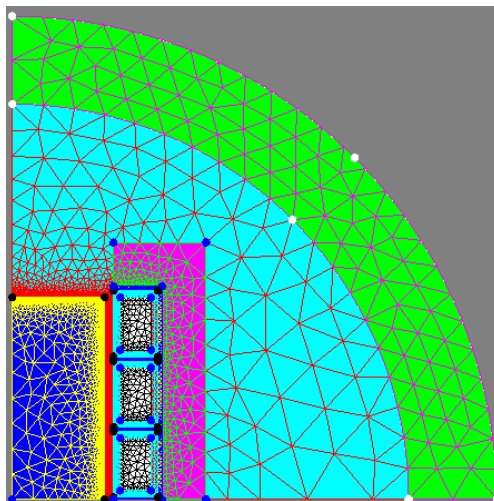


运行完之后，可以得到自动的网格设置：



2.9 网格剖分

经过 2.3 和 2.8 设置之后，可以得到如下网格：



得到网格的检查结果如下：

```
Surface elements :
  Number of elements not evaluated      : 0 %
  Number of excellent quality elements : 99.67 %
  Number of good quality elements       : 0.33 %
  Number of average quality elements   : 0 %
  Number of poor quality elements       : 0 %
  meshFaces executed
```

保存 project 为 GeoMesh.FLU。

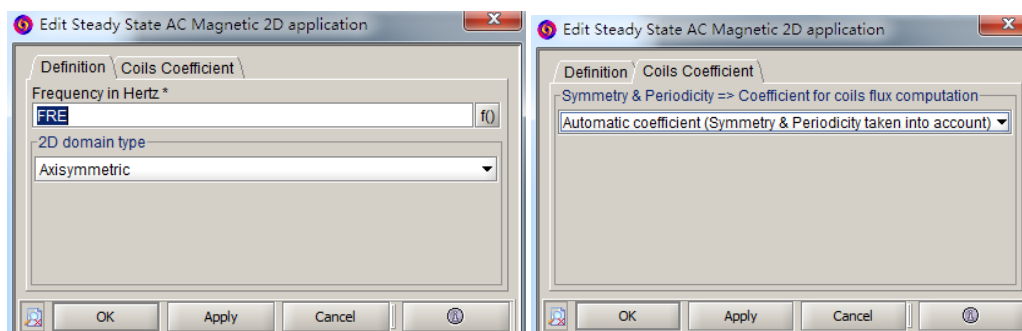
3. 工况 1

将 GeoMesh.FLU 转存为 “Case1.FLU”，用于工况 1。工况 1 计算的是在通电电流的作用下，整个模型的磁场以及涡电流分布。

3.1 物理设置

求解模式为 “Steady State AC Magnetic 2D”。

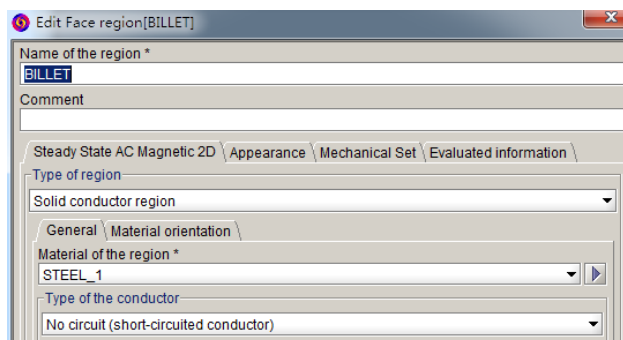
详细设置求解模式如下：



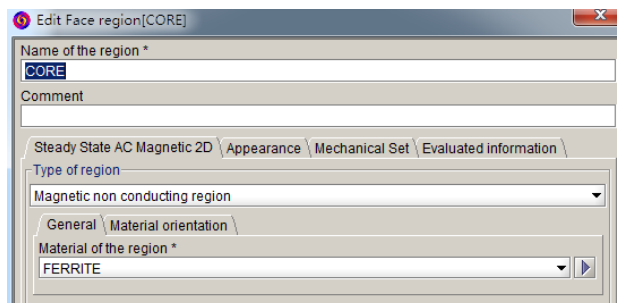
然后就可以设置材料了，材料设置详见 2.4 节。在这种工况下，只需要 Copper，

Ferrite 和 Steel_1。

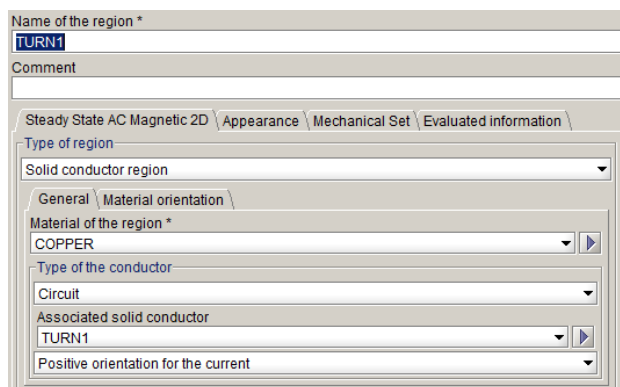
修改设置 BILLET 区域物理参数如下：



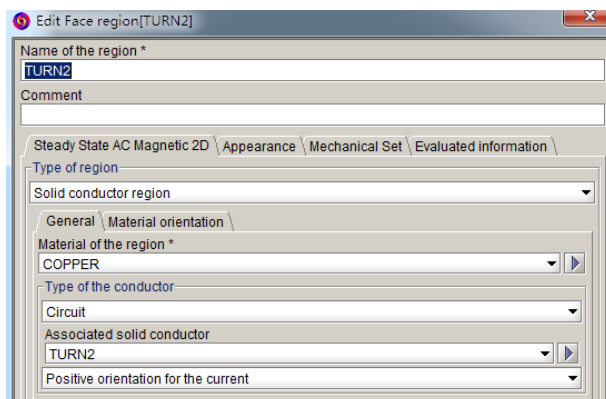
修改 Core 区域物理参数如下：



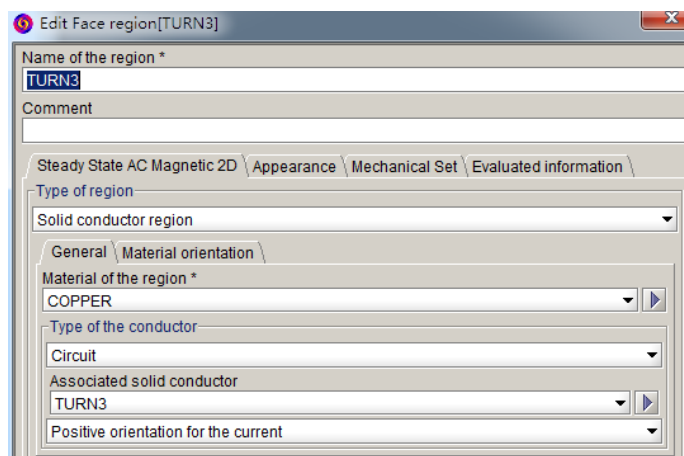
修改 TURN1 区域如下：



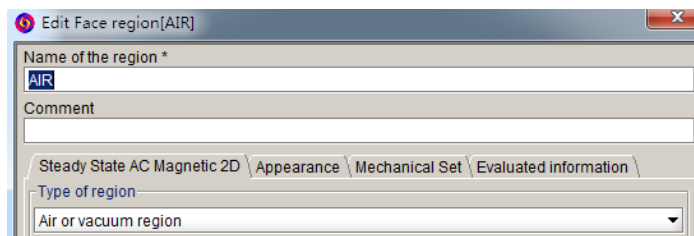
修改 TURN2 区域物理参数如下：



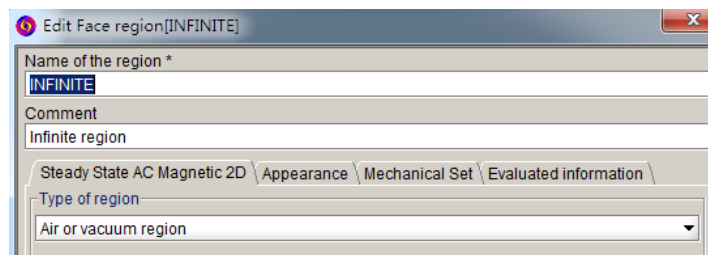
修改 TURN3 区域物理参数如下：



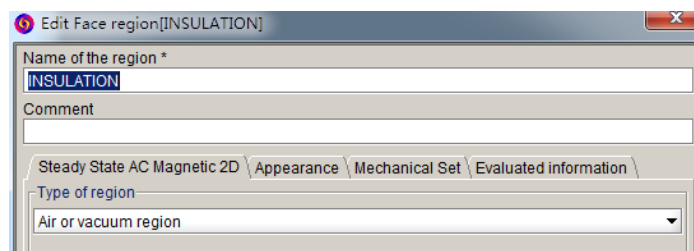
修改空气区域（Air）物理参数如下：



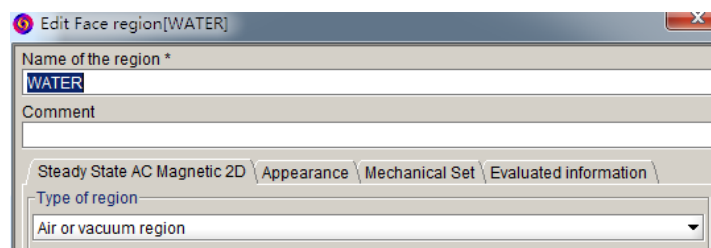
修改 INFINITE 区域物理参数如下：



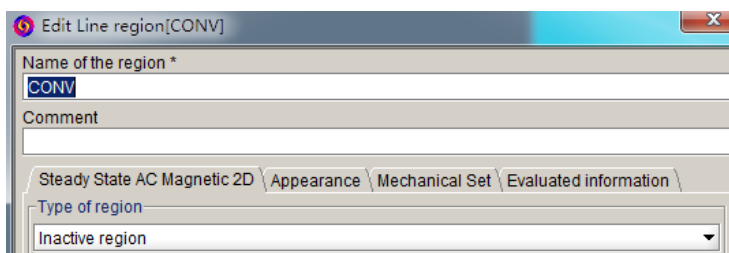
修改绝缘体（Insulation）区域物理参数如下：



修改冷却水（Water）区域物理参数如下：

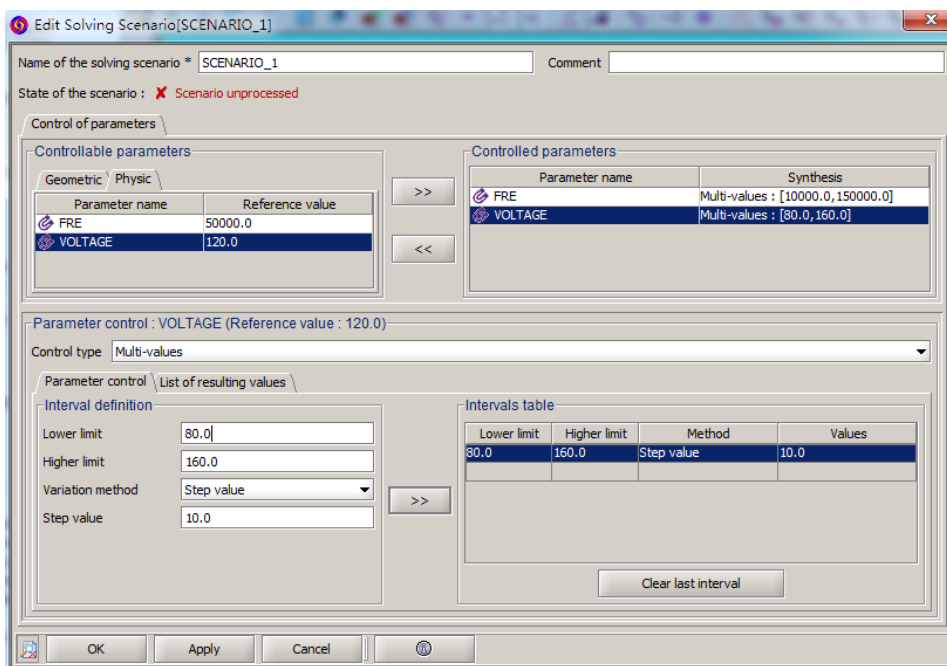
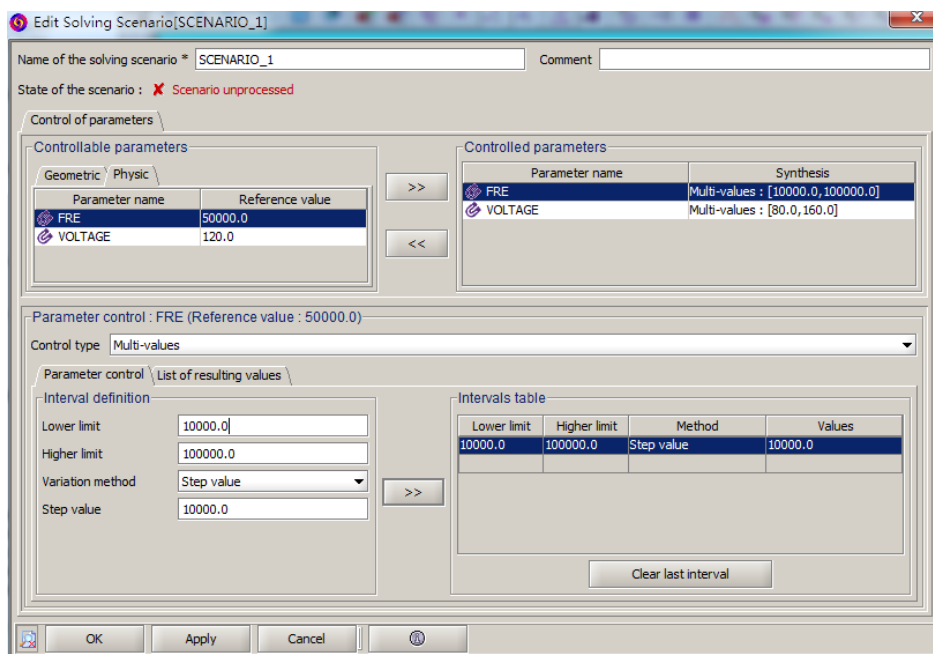


修改钢胚表面的热交换边界（CONV）：



3.2 计算设置

新建“SCENARIO_1”，设置两个物理变量 FRE 和 VOLTAGE 的取值如下：



设置完之后，做网格检查和物理检查，没有问题的话，开始求解。如果有报错，根据报错信息和上述的设置信息仔细检查问题，直到通过网格检查和物理检查。

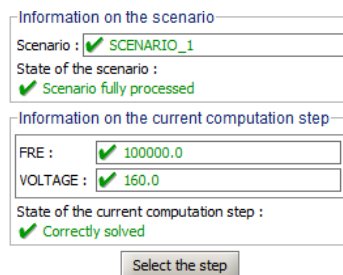
3.3 计算结果

求解结束后，察看计算结果。

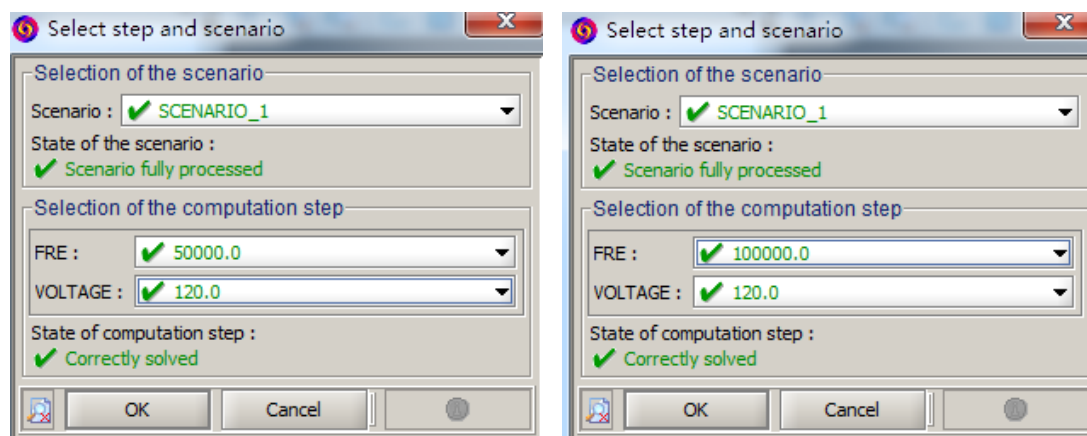
在窗口的左下角，可以选择物理变量的具体值，选定后，则后续看到的后处理结果就是在此具体值的条件下计算出来的。

3.3.1 计算涡流损耗

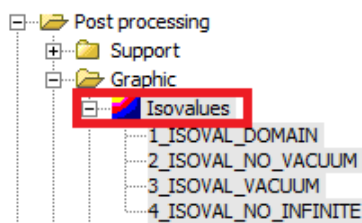
默认情况下，Fre 和 Voltage 的值为参数设置中的最后一个值，即 Fre=100KHz, Voltage=160V。如下图所示：



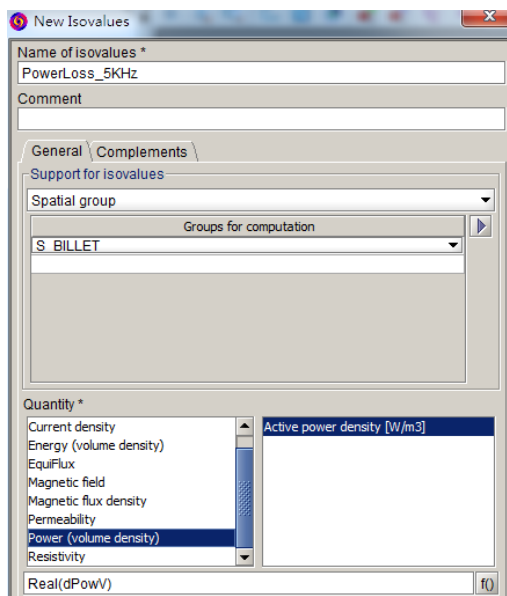
分别选择 Fre=50KHz, Voltage=120V 和 Fre=100KHz, Voltage=120V 两种情况：



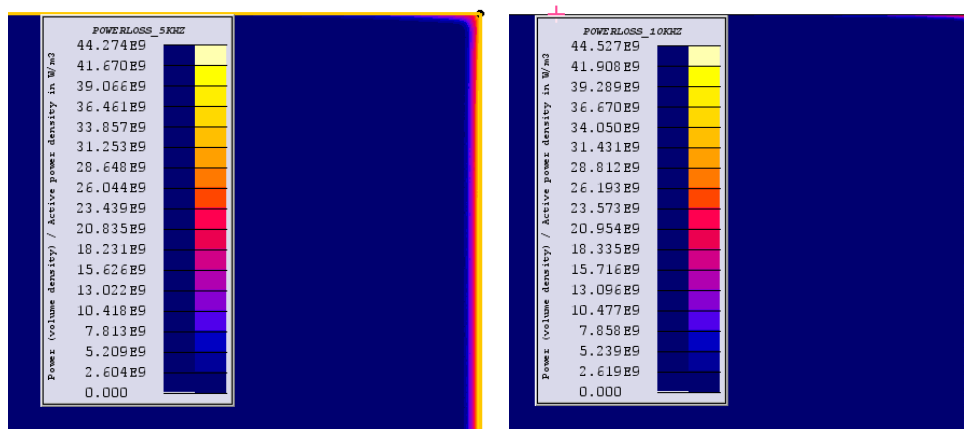
在这两种情况下，分别计算钢胚上的涡流损耗。



计算 Billet 区域上的涡流损耗（焦耳损耗）彩色云图 “Isovalues”，如下图所示：



得到两种状态下钢胚上的涡流损耗（焦耳损耗），如下图所示：



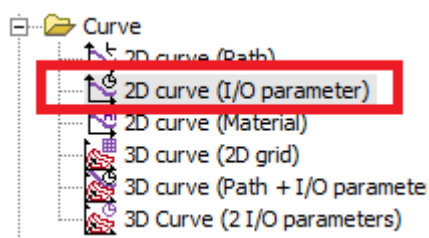
50KHz, 120V

100KHz, 120V

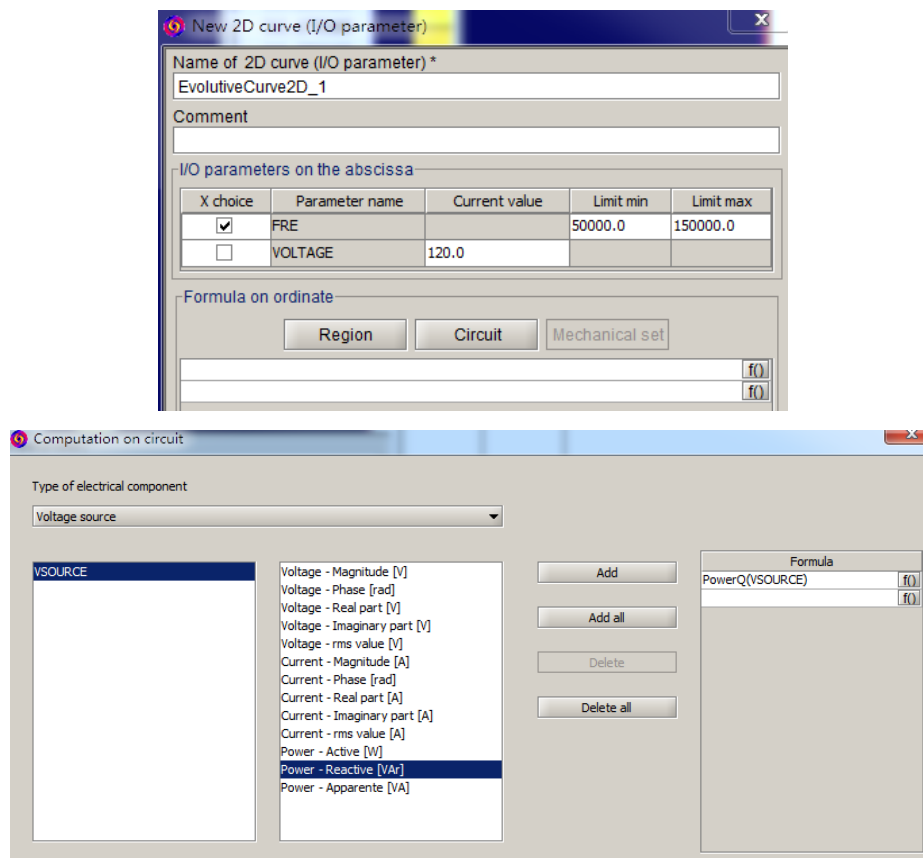
显然，频率越高，集肤深度越浅。

3.3.2 计算输出功率

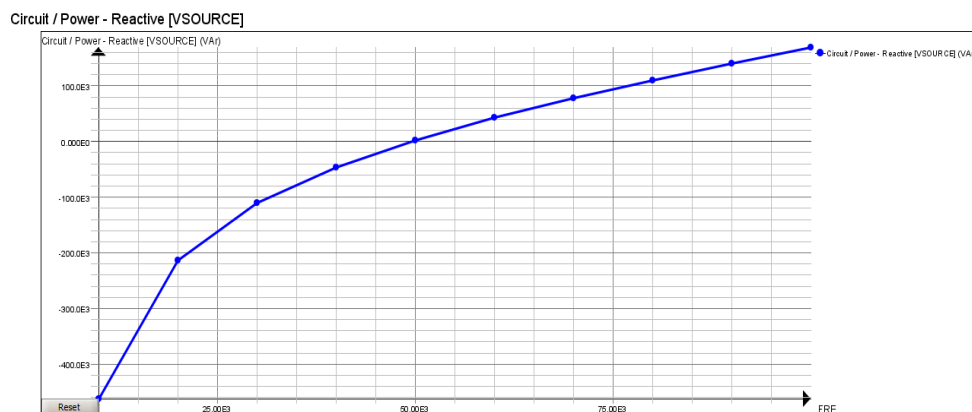
下面计算电压源输出的无功功率（Reactive Power）。在后处理 Curve 中选择 2D Curve(I/O Parameter):



在新建窗口中，按照如下设置：

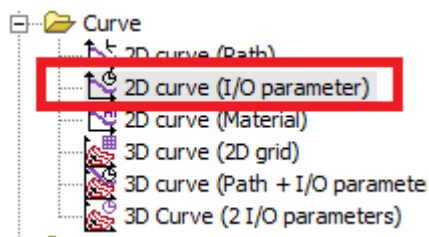


得到如下曲线：



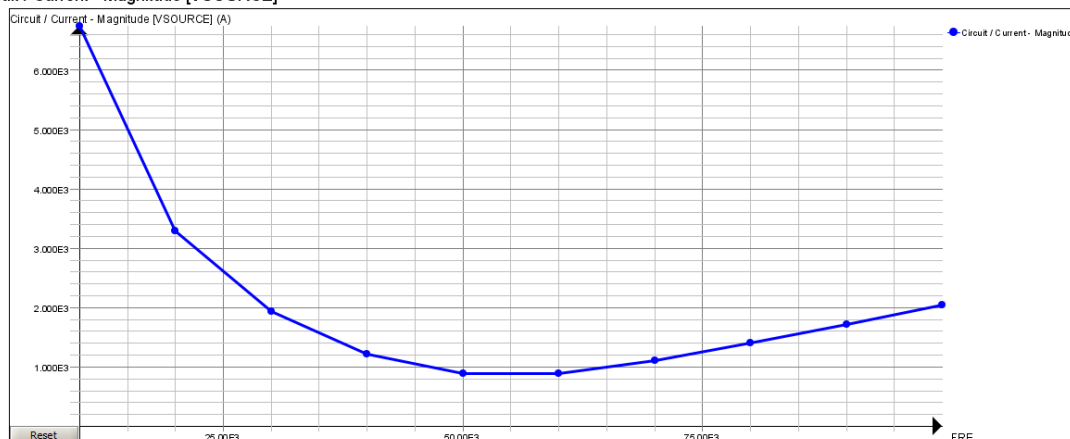
3.3.3 计算电源电流

下面计算通电源的供电电流。在后处理 Curve 中选择 2D Curve(I/O Parameter)：



在新建窗口中，按如下设置：

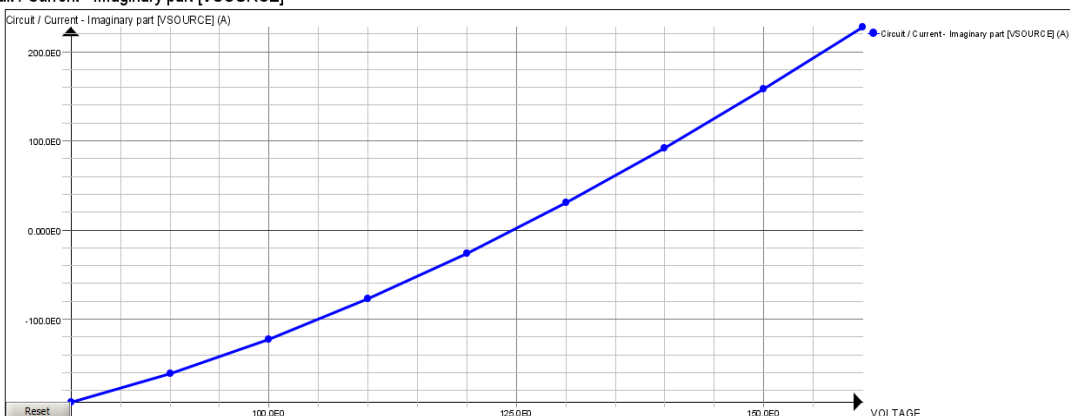
Circuit / Current - Magnitude [VSOURCE]



可以看到，电源的谐振点在大约 50KHz 左右。

相同的办法，可以得到电源电流的虚部在 50KHz 时，随电压的变化曲线：

Circuit / Current - Imaginary part [VSOURCE]



工况 1 的仿真计算结束，保存此 Project。

4. 工况 2

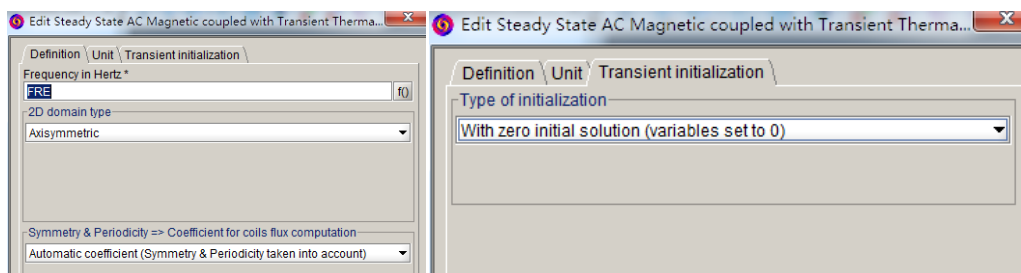
将 Case1.FLU 另存为 Case2.FLU，开始计算工况 2。工况 2 计算的是在通电流的作用下，整个模型的磁场、涡电流分布以及温度场分布随时间变化的曲线，因此。首先删除计算结果，并且删除求解模式。

4.1 物理设置

求解模式选择为 “Steady State AC Magnetic Coupled With Transient Thermal 2D”。删除上一个求解模式后，电路随之也被删除，因此需要重新画电路并设置电路各参数。详细过程参考 2.6 节内容，这里不再赘述。

电路设置好之后，才可以向下继续设置 Region 的参数。

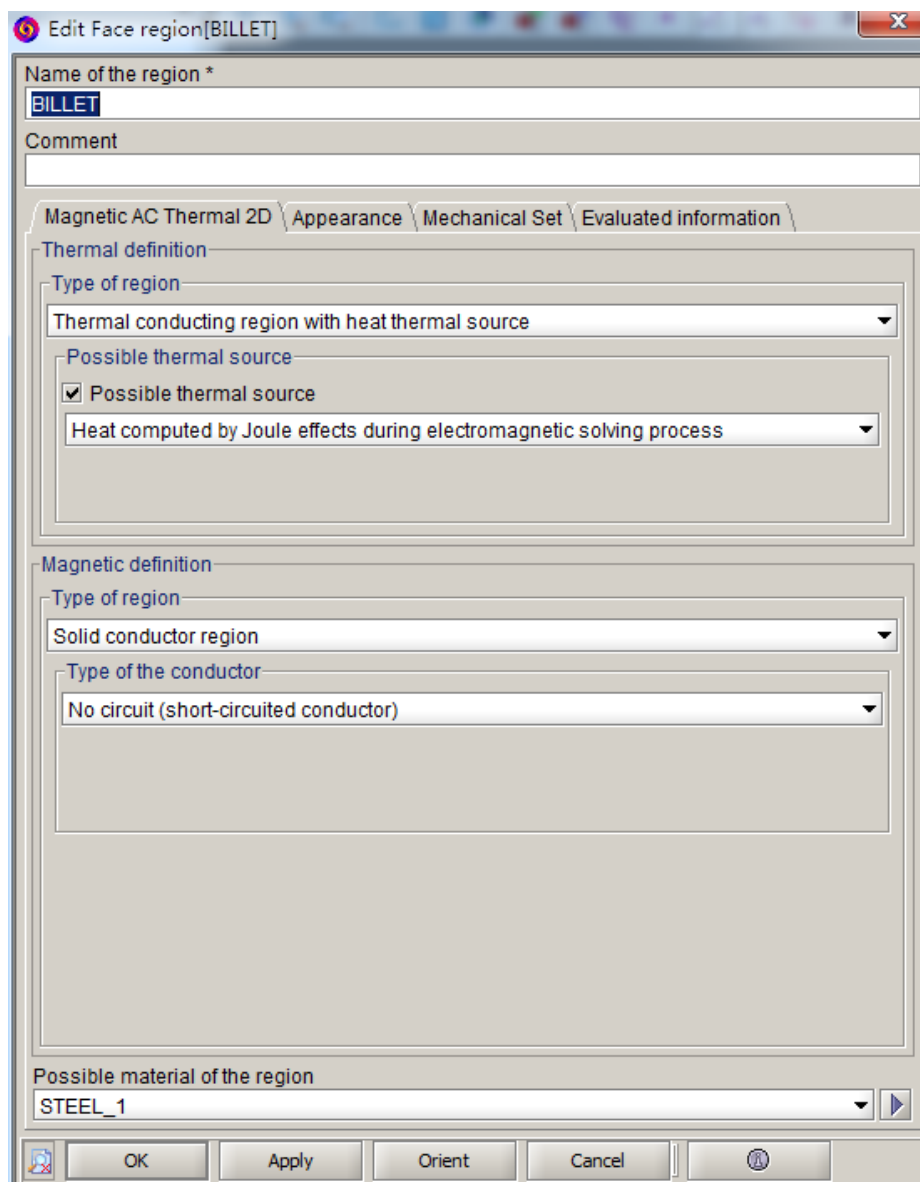
详细设置求解模式如下：



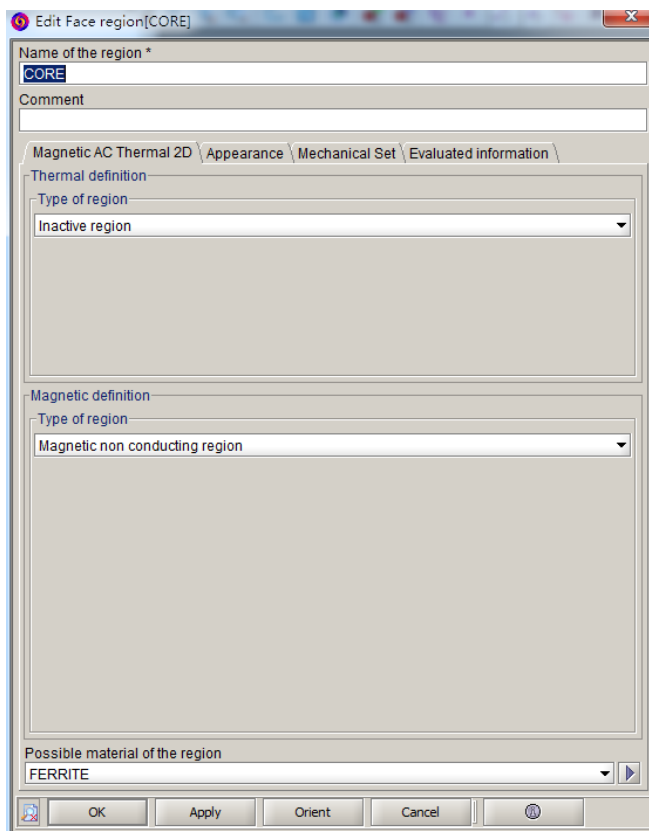
在 Uinit 中，选择摄氏度为温度单位。

然后就可以设置材料了，材料设置详见 2.4 节。在这种工况下，只需要 Copper, Ferrite 和 Steel_1。由于在 Case1.FLU 中已经设置好，这里不需要做任何改动。

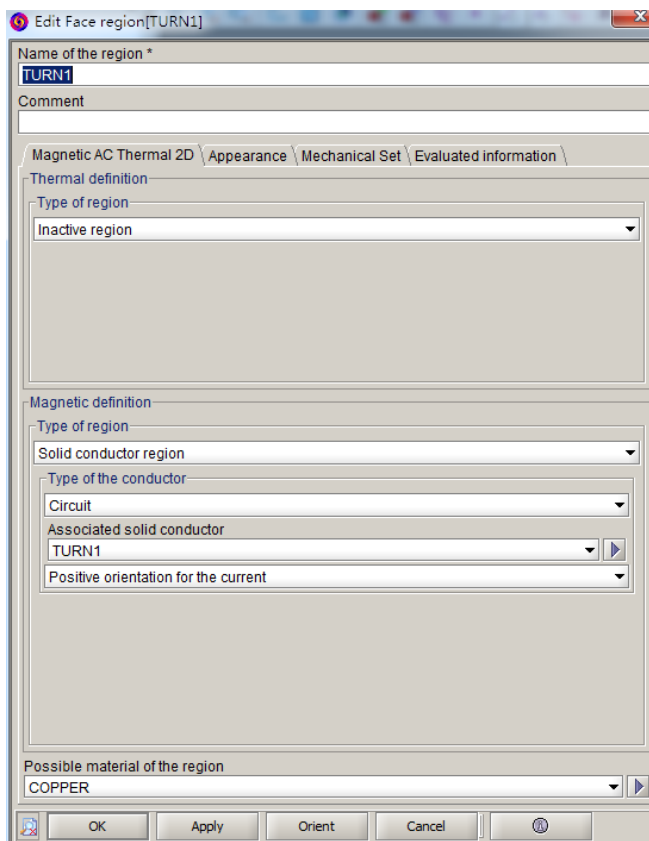
修改设置 BILLET 区域物理参数如下：



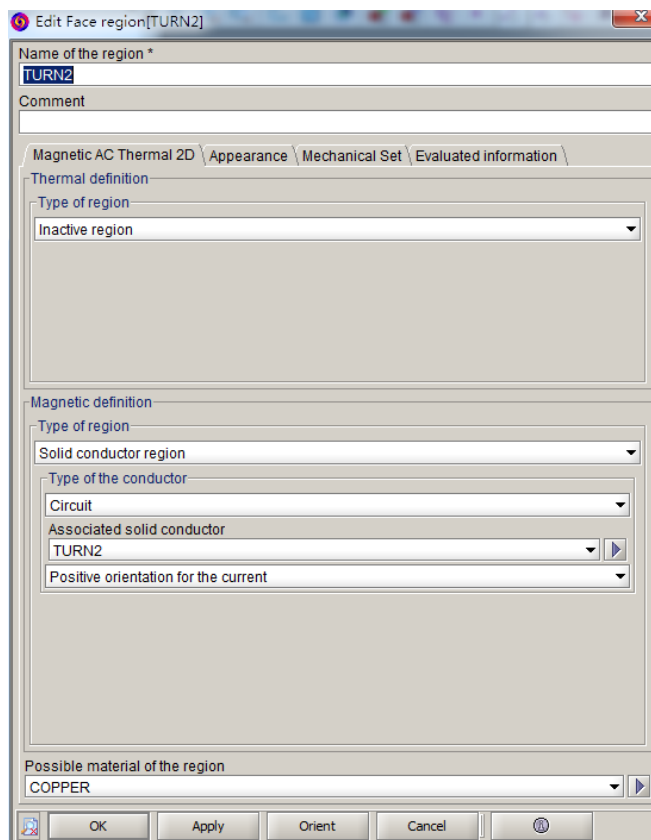
修改 Core 区域物理参数如下：



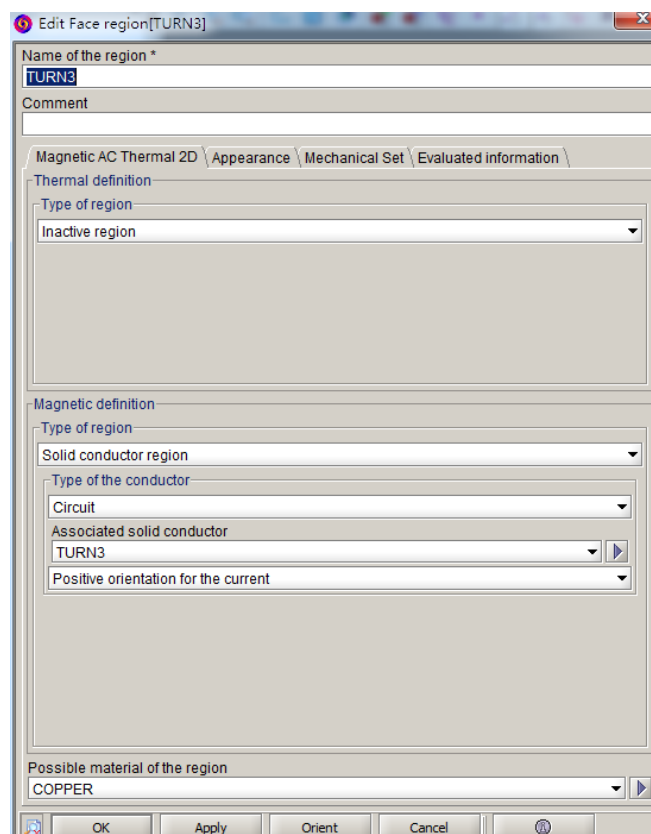
修改 TURN1 区域如下：



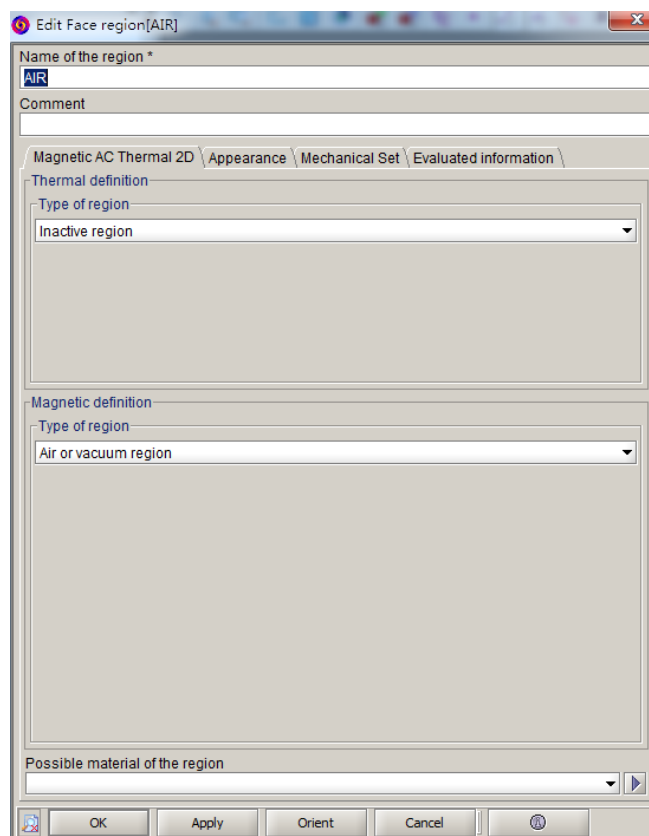
修改 TURN2 区域物理参数如下：



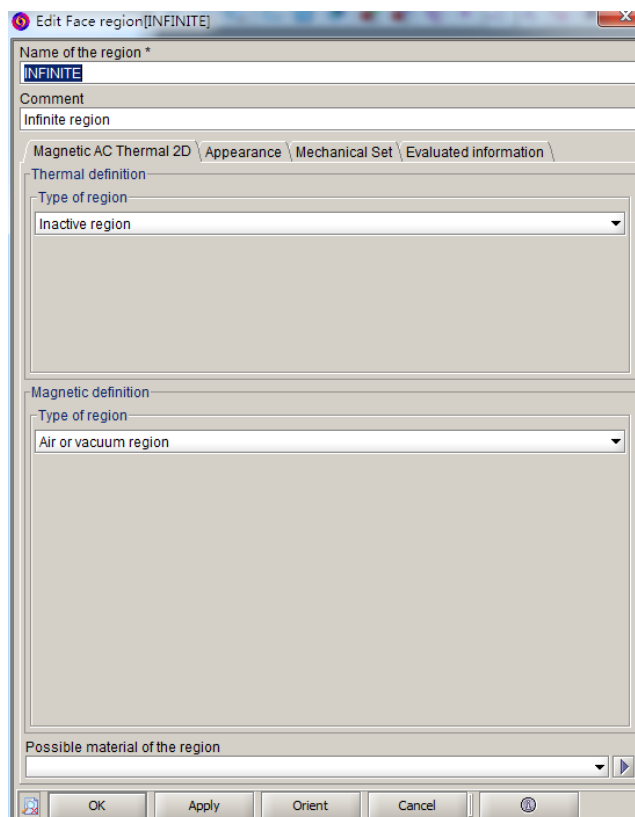
修改 TURN3 区域物理参数如下：



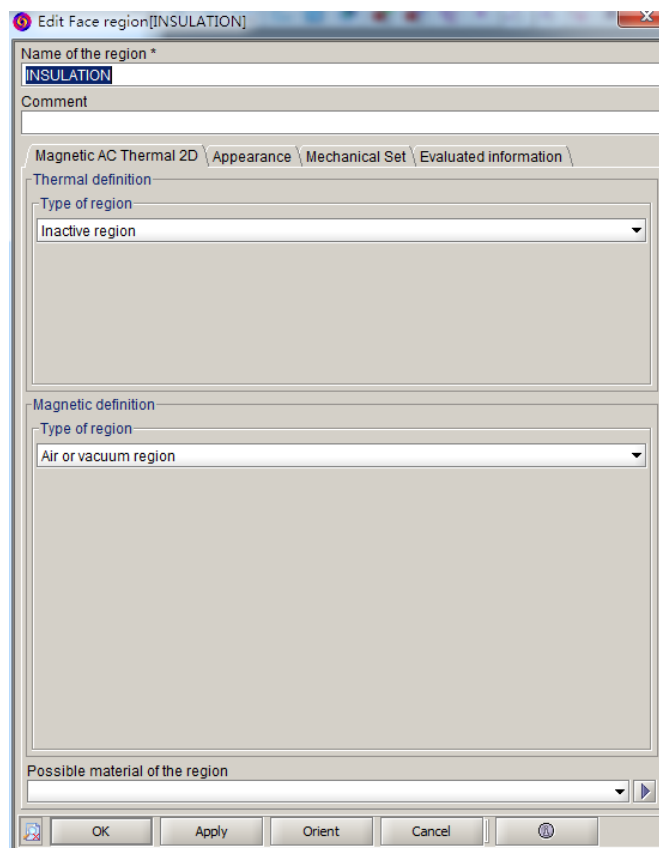
修改空气区域（Air）物理参数如下：



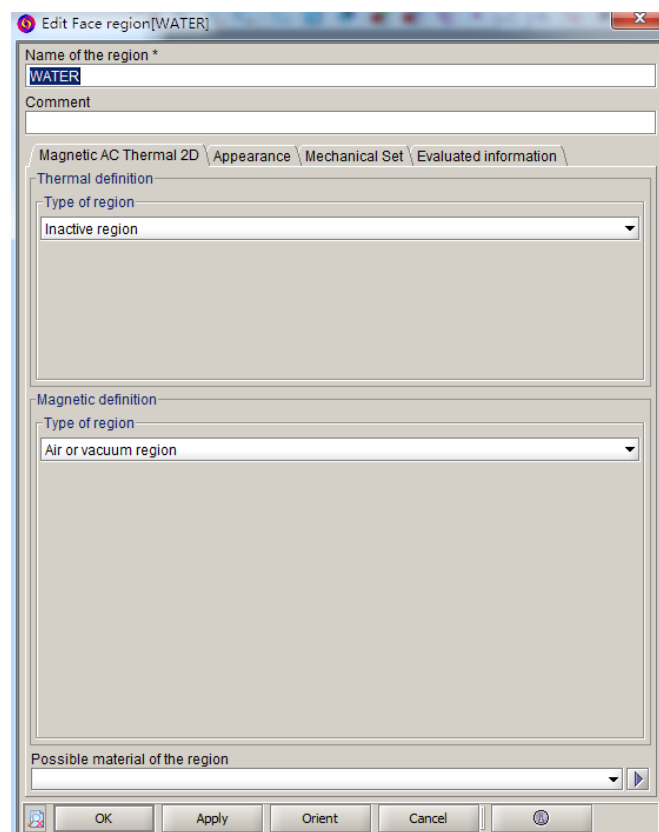
修改 INFINITE 区域物理参数如下：



修改绝缘体（Insulation）区域物理参数如下：



修改冷却水（Water）区域物理参数如下：



修改钢胚表面的热交换边界（CONV）：

Edit Line region[CONV]

Name of the region *
CONV

Comment

Magnetic AC Thermal 2D \ Appearance \ Mechanical Set \ Evaluated information \

Thermal definition

Type of region
Region with surface of thermal exchanges and heat source

General \ Thermal \

Possible source heat
☐ Possible source heat
Heat computed by Joule effects during electromagnetic solving process

Magnetic definition

Type of region
Inactive region

Possible material of the region

Possible thickness of the region (m)

OK Apply Cancel

Edit Line region[CONV]

Name of the region *
CONV

Comment

Magnetic AC Thermal 2D \ Appearance \ Mechanical Set \ Evaluated information \

Thermal definition

Type of region
Region with surface of thermal exchanges and heat source

General \ Thermal \

Thermal exchange coefficients
Formula with I/O parameters

Coefficient	Expression
Convection	20 f()
Emissivity	0.5 f()

External temperature
Temperature value *
20 f()

unit (by default, application unit)
CELSIUS_DEGREE

Magnetic definition

Type of region
Inactive region

Possible material of the region

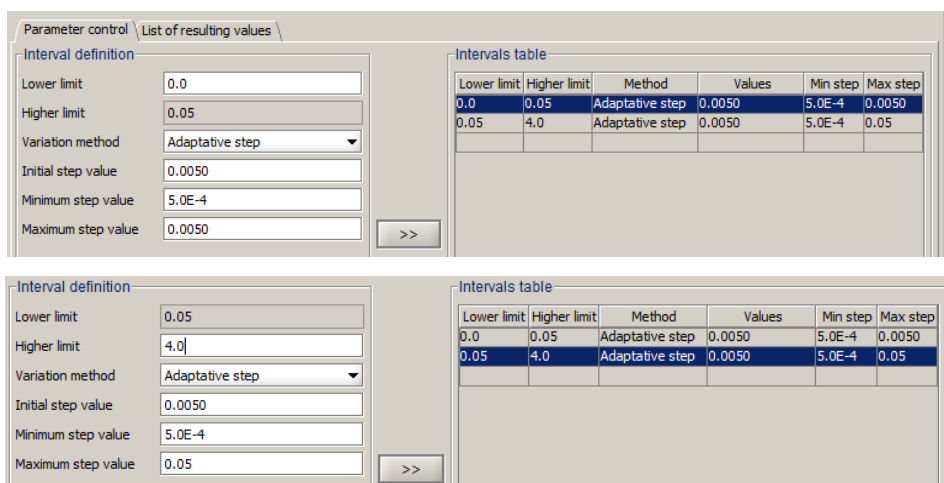
Possible thickness of the region (m)

OK Apply Cancel

4.2 计算设置

新建“SCENARIO_1”，FRE 和 Voltage 在这里不再做为变量，而是取定值

50KHz 和 120V。“SCENARIO_1”里面选择“Control by time”，时间参数设置如下图所示：

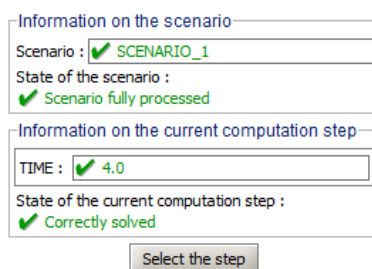


设置完之后，做网格检查和物理检查，没有问题的话，开始求解。如果有报错，根据报错信息和上述的设置信息仔细检查问题，直到通过网格检查和物理检查。

4.3 计算结果

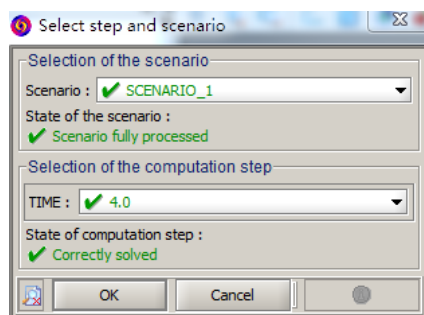
求解结束后，察看计算结果。

在窗口的左下角，可以选择物理变量的具体值，选定后，则后续看到的后处理结果就是在此具体值的条件下计算出来的。

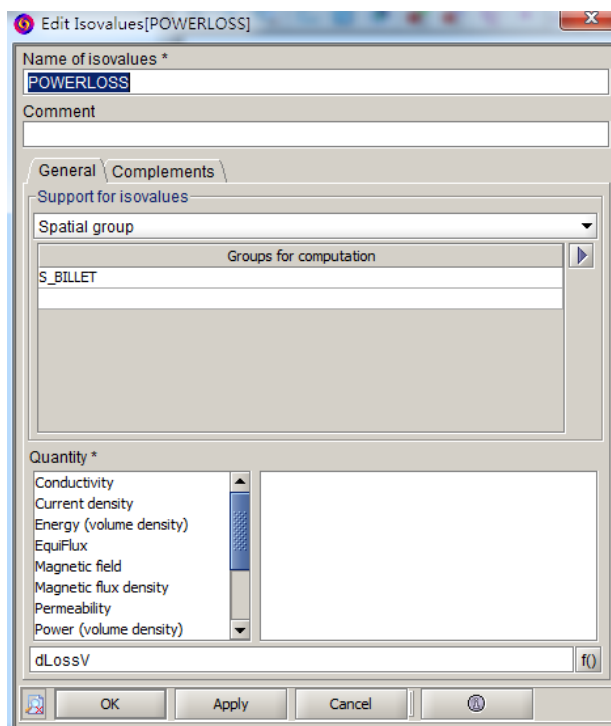


4.3.1 功率损耗计算结果

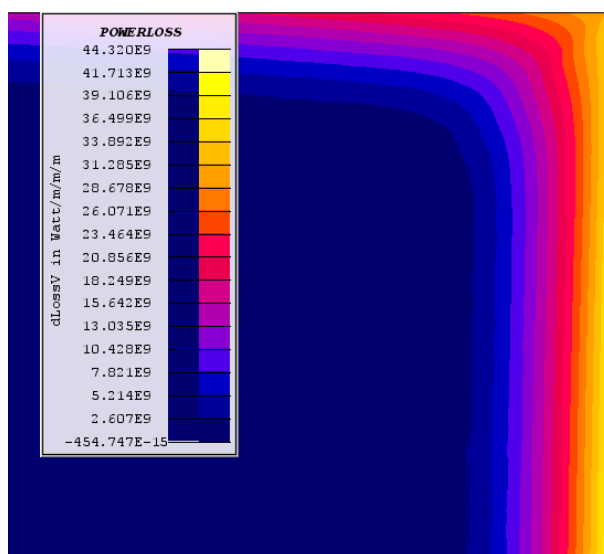
计算在 $t=4$ 秒时，钢胚上的功率损耗值。选择 $t=4s$ 的时刻：



新建 isovalues 彩色云图：

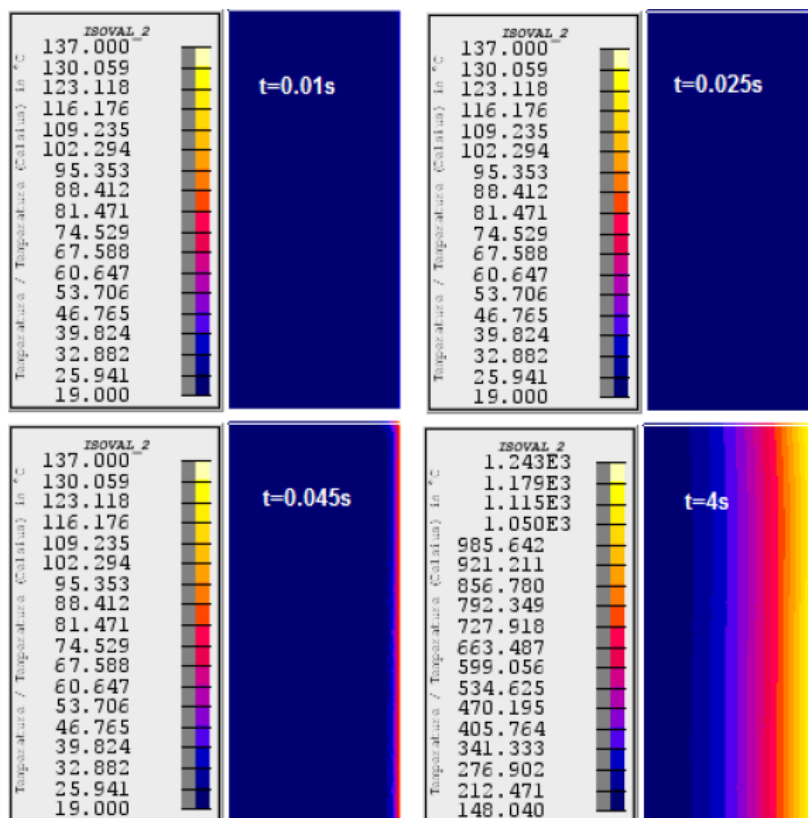


得到后处理结果：



4.3.2 瞬态温度计算结果

按照相同的方法得到以下 4 个时刻钢胚上的温度云图。这四个时刻分别是 0.01s, 0.025s, 0.045s 和 4s。

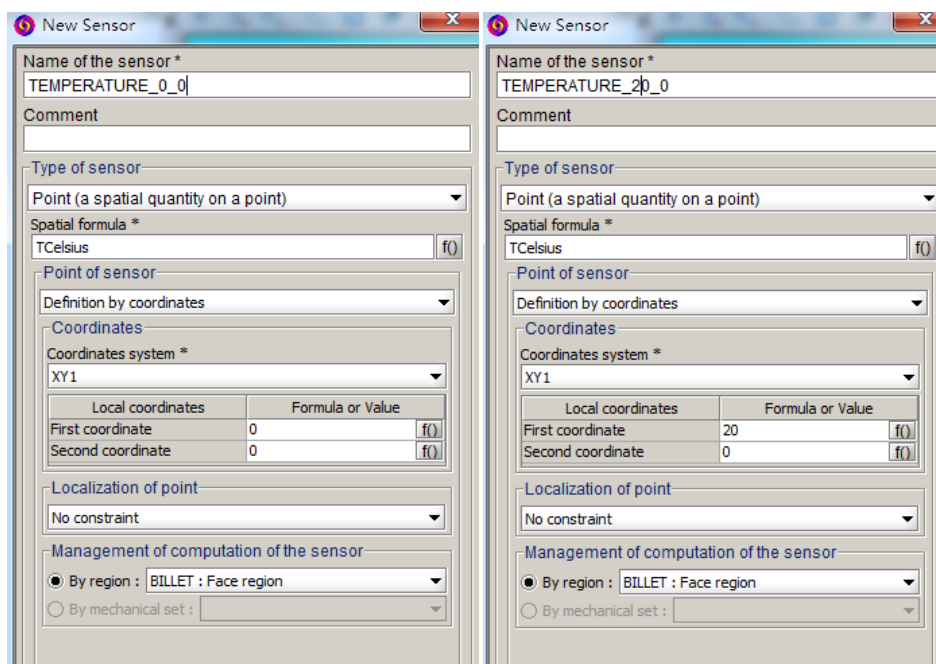


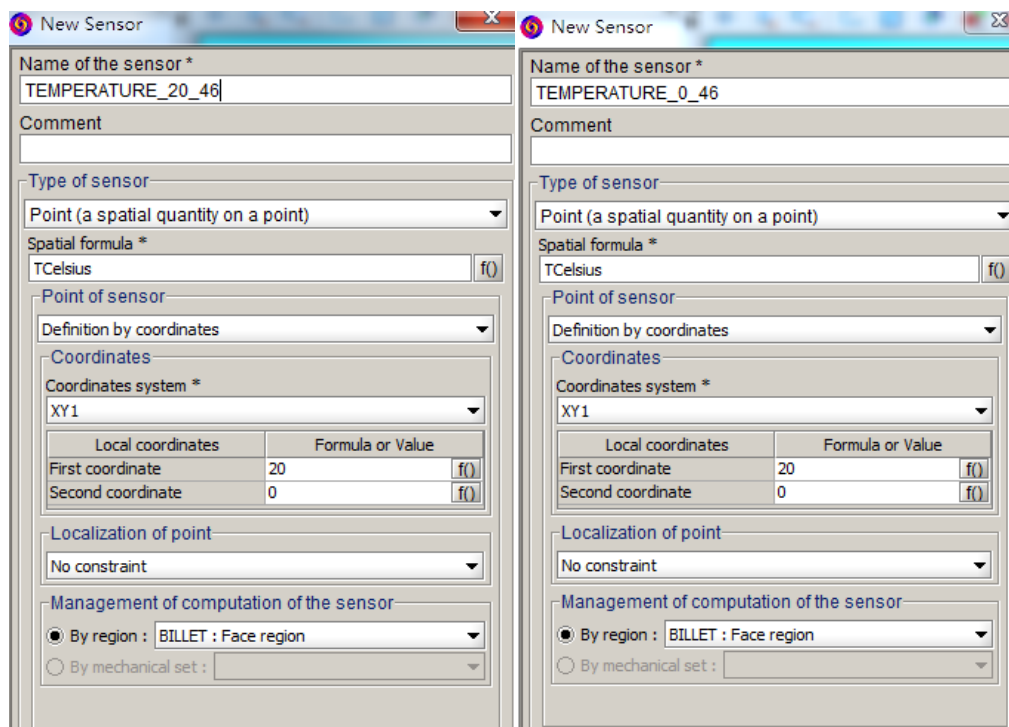
可以看出来，温度随时间在显著升高，并且热量在往里面传导。

4.3.3 单点温度变化曲线

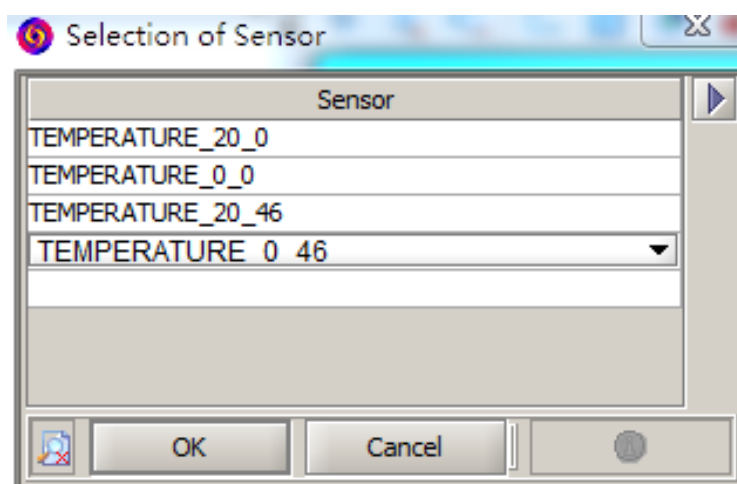
在 Sensor 中设置四个点，即钢胚的四个顶点，用于监测这四个点上的温度变化。

这四个点的创建如下图所示：

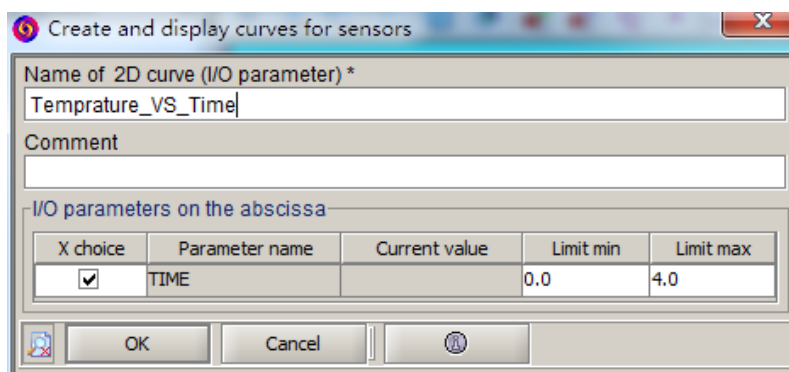




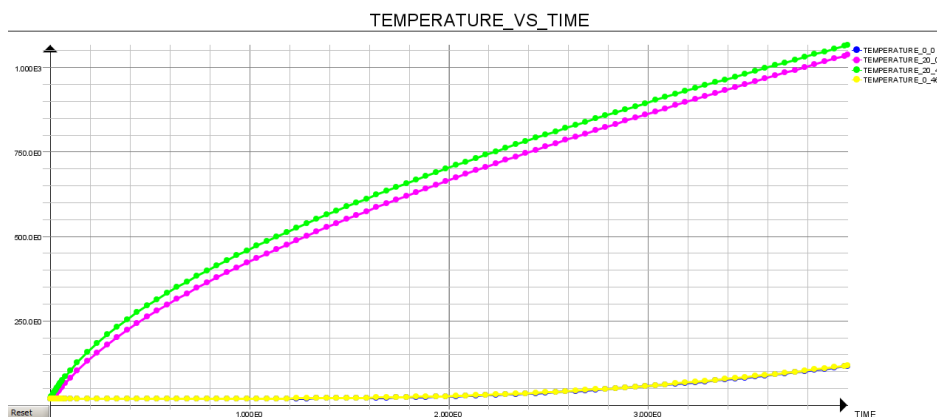
创建之后，观察这四个点的温度随时间变化的曲线。点击
Advance->Sensor->Display Curve, 在跳出的对话框中选择这四个监测点(Sensor):



然后设置如下变量:



然后得到四个监测点的温度变化曲线：



工况 2 结束，保存此 Project。

5. 工况 3

将 Case2.FLU 另存为 Case3.FLU，开始计算工况 3。工况 3 是在通电电流的作用下，计算整个模型的磁场、涡电流分布以及温度场分布随时间变化的曲线，不同的是，在此情况下，要计算温度场和磁场的互藕，即根据涡流损耗计算出钢胚温度，再根据钢胚温度更新钢胚的电磁参数，根据新的电磁参数再计算涡流损耗，这样循环迭代，最后得到准确的磁场和温度常计算结果。

首先删除上一次的计算结果，求解模式不需要删除，仍然是 Steady State AC Magnetic Coupled With Transient Thermal 2D，里面的所有参数都不改变。

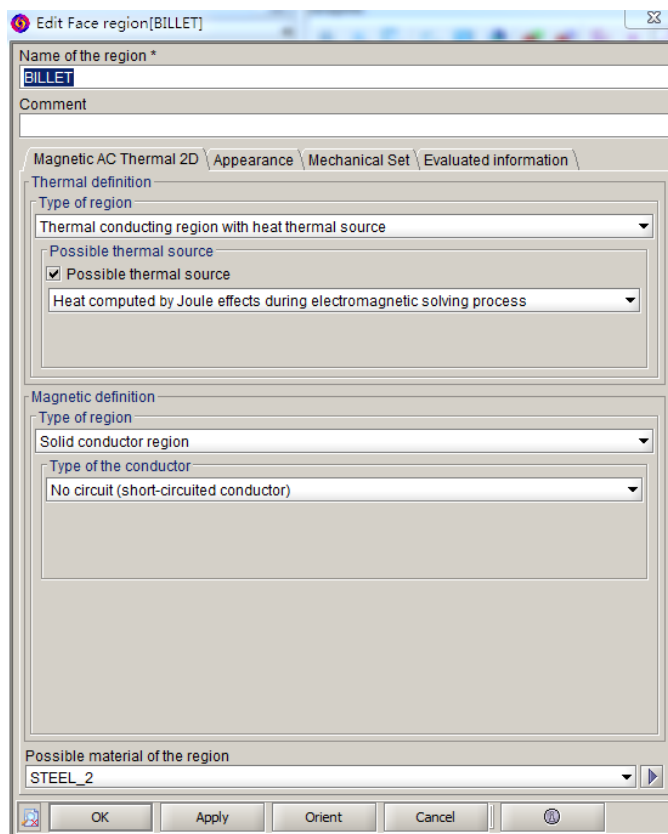
5.1 物理设置

首先设置材料，材料设置详见 2.4 节。在这种工况下，只需要 Copper, Ferrite 和 Steel_2。

Core 区域，TURN1 区域，TURN2 区域，TURN3 区域，空气区域 (Air)，INFINITE 区域，绝缘体 (Insulation) 区域，冷却水 (Water) 区域以及 CONV 区域的参数都不变。

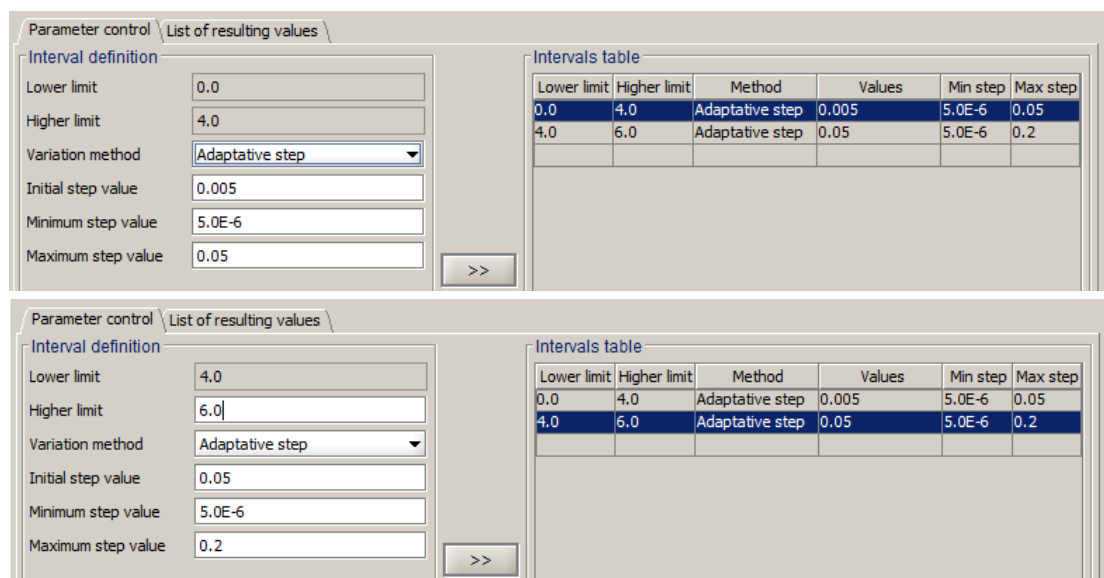
只有 BILLET 的参数需要改变，把 BILLET 的材料修改为 STEEL_2，使用 STEEL_2 设置的材料参数，就可以计算热场和磁场的耦合。

修改设置 BILLET 区域物理参数如下：



5.2 计算设置

新建“SCENARIO_1”，FRE 和 Voltage 取定值 50KHz 和 120V。“SCENARIO_1”里面选择“Control by time”，时间参数设置如下图所示：



设置完之后，做网格检查和物理检查，没有问题的话，开始求解。如果有报

错，根据报错信息和上述的设置信息仔细检查问题，直到通过网格检查和物理检查。

5.3 计算结果

求解结束后，察看计算结果。

在窗口的左下角，可以选择物理变量的具体值，选定后，则后续看到的后处理结果就是在此具体值的条件下计算出来的。

Information on the scenario

Scenario : ☒ SCENARIO_1

State of the scenario :
☒ Scenario fully processed

Information on the current computation step

TIME : ☒ 6.0

State of the current computation step :
☒ Correctly solved

Select the step

5.3.1 功率损耗计算结果

计算在 $t=4$ 秒时，钢胚上的功率损耗值。选择 $t=4s$ 的时刻：

Information on the scenario

Scenario : ☒ SCENARIO_1

State of the scenario :
☒ Scenario fully processed

Information on the current computation step

TIME : ☒ 4.0

State of the current computation step :
☒ Correctly solved

Select the step

新建 isovalues 彩色云图：

Edit Isovalues[POWERLOSS]

Name of isovalues *
POWERLOSS

Comment

General \ Complements \

Support for isovalues

Spatial group

Groups for computation

S_BILLET

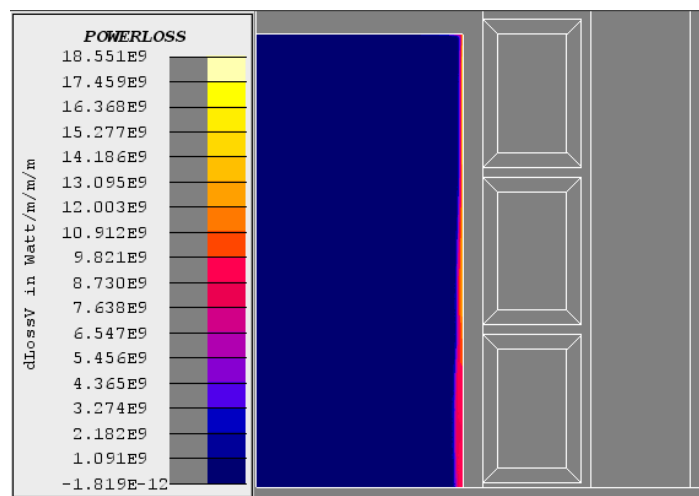
Quantity *

Conductivity
Current density
Energy (volume density)
EquiFlux
Magnetic field
Magnetic flux density
Permeability
Power (volume density)

dLossV

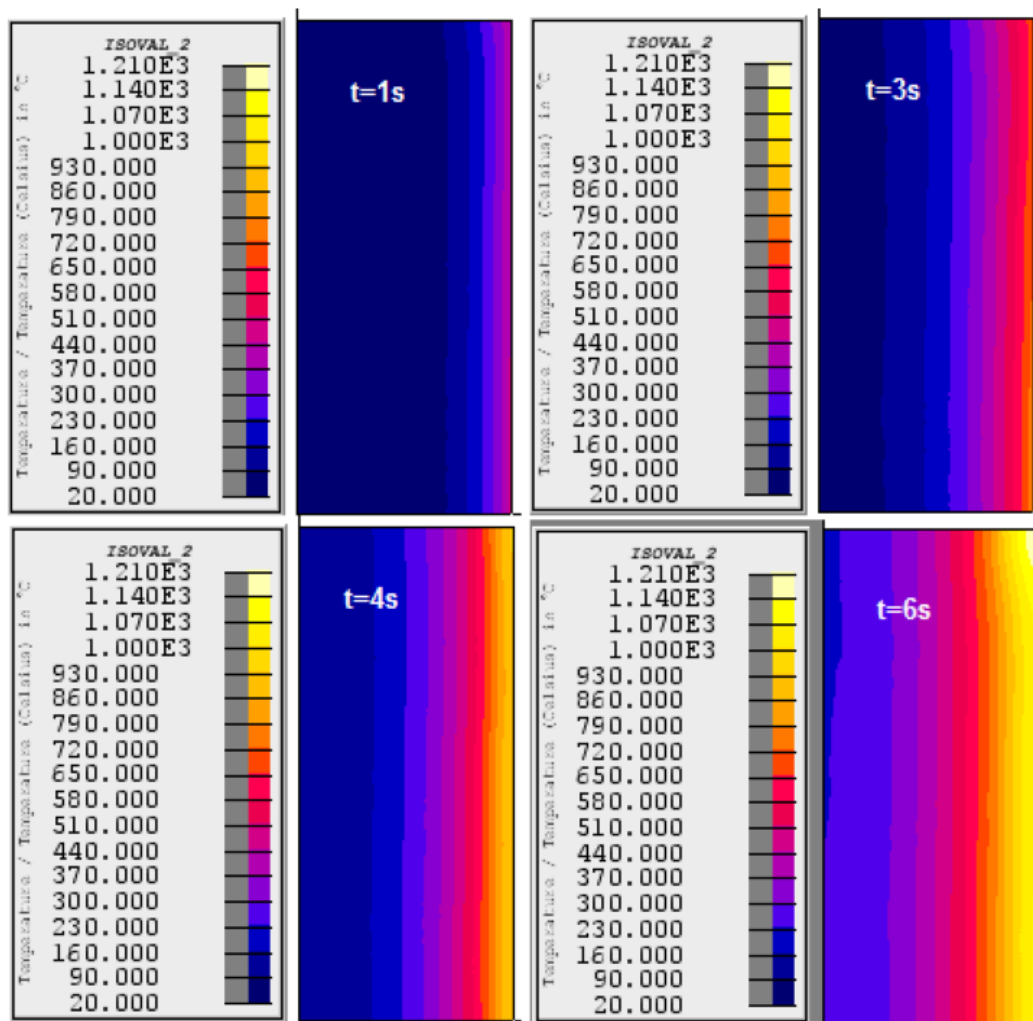
OK Apply Cancel

得到后处理结果：



5.3.2 瞬态温度计算结果

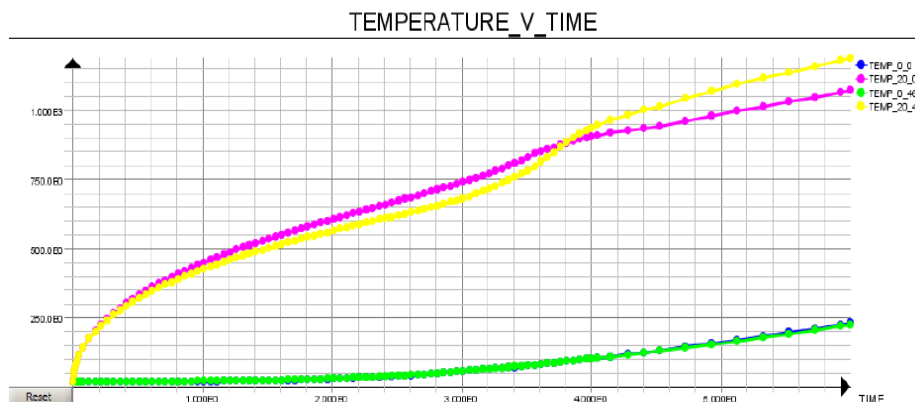
按照相同的方法得到以下 4 个时刻钢胚上的温度云图。这四个时刻分别是 1s, 3s, 4s 和 6s。



可以看出来，温度随时间在显著升高，并且热量在往里面传导。

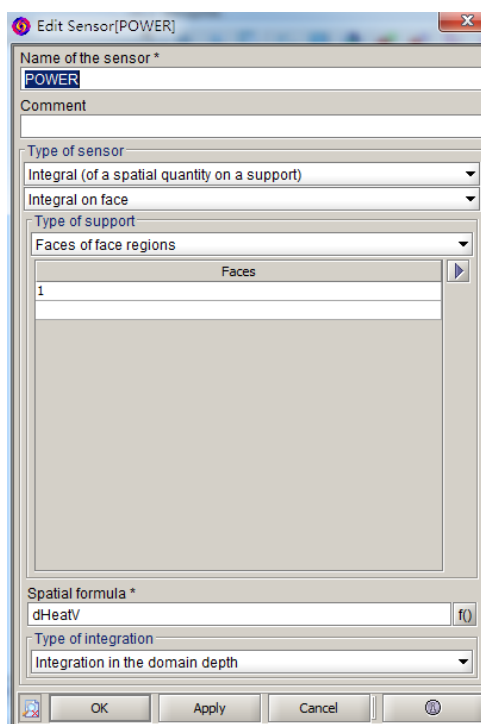
5.3.3 单点温度变化曲线

参考 4.3.3 中的设置方法，得到钢胚的四个顶点的温度变化曲线，如下图所示：

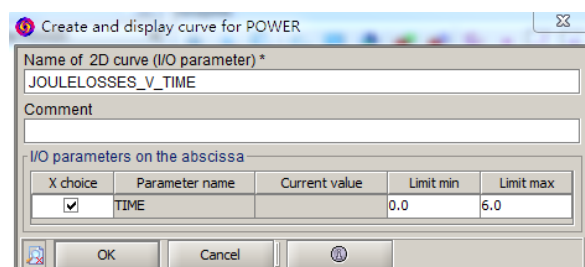


5.3.4 计算钢胚上的焦耳热随着时间的变化曲线

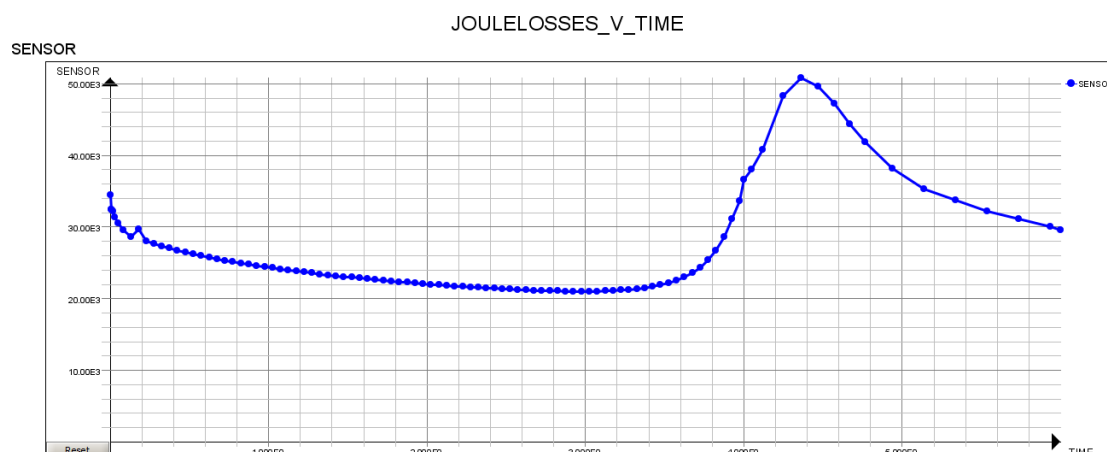
在 Sensor 里面增加 BILLET 上的焦耳热一项：



设置好之后，点击 Advanced->Sensor->Display Curve，设置如下：



得到如下曲线：

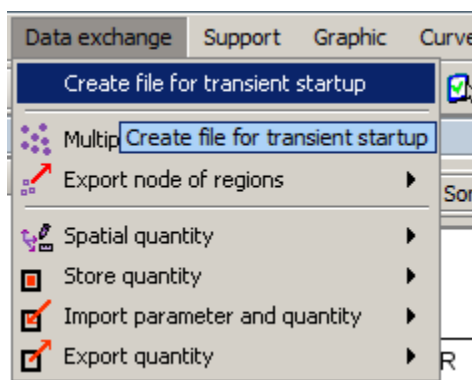


工况 3 计算结束，保存此 Project。

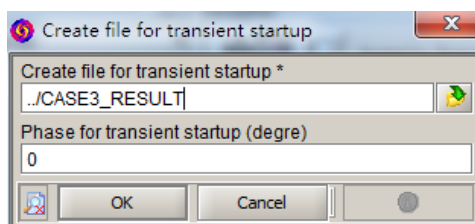
6. 工况 4

最后一种情况是模拟钢胚的冷却过程。此过程仍然要考虑热场和磁场的互藕，所以要选择“Steady State AC Magnetic Coupled with Transient Thermal Application”模式。此过程要以工况 3 的结束状态为起始。

首先在 Case3.FLU 中点击 Data Exchange->Create File for Transient Startup，如下图所示：



选择合适的路径，输入文件名，点击保存（Save），得到如下对话框：

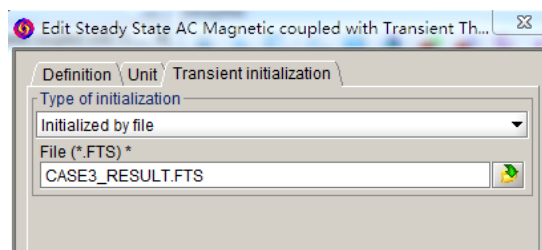


点击“OK”完成保存。

然后将 Case3.FLU 另存为 Case4.FLU。

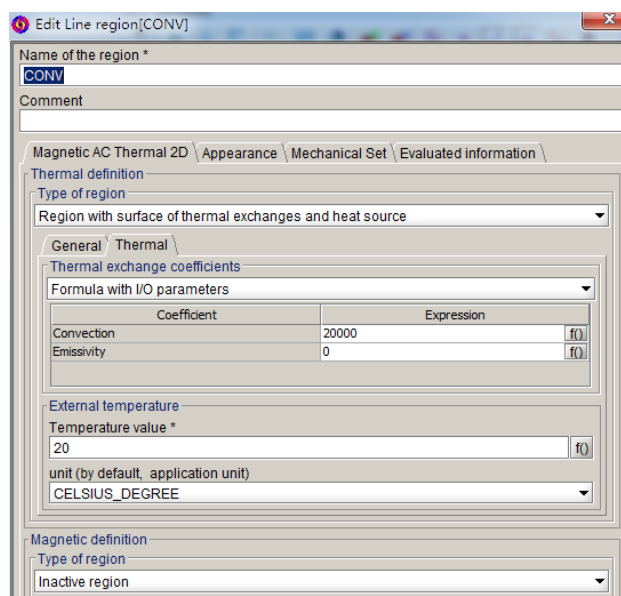
6.1 物理设置

修改 Case4.FLU 的求解模式，在“Transient Initialization”中设置如下：



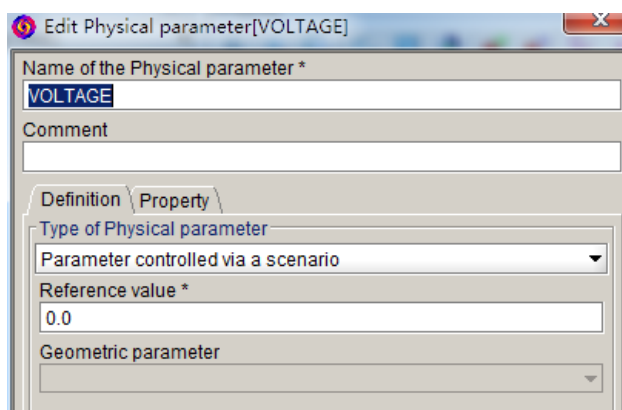
CASE3_RESULT.FTS 是刚才保存的 Case3.FLU 的 Data Exchange 文件。

在 Case4 种，材料无需修改，只需要修改 CONV 和 Voltage 两个参数。修改“Line Region”的 CONV 如下图所示：



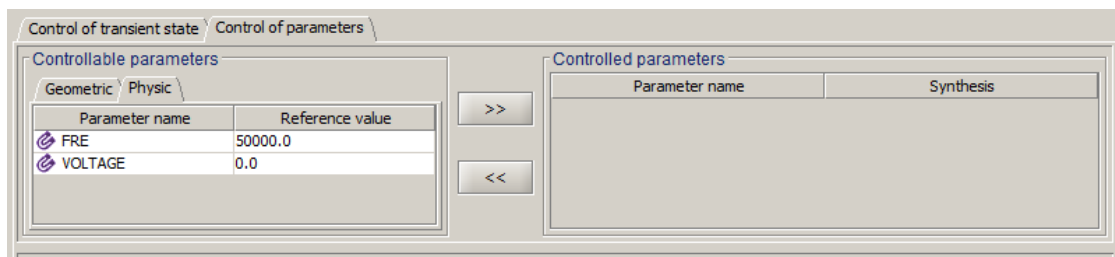
由于淬火过程非常快速，因此将换热系数设置为 20000，辐射率设置为 0。

另外把电压源的电压参考值设置为 0：

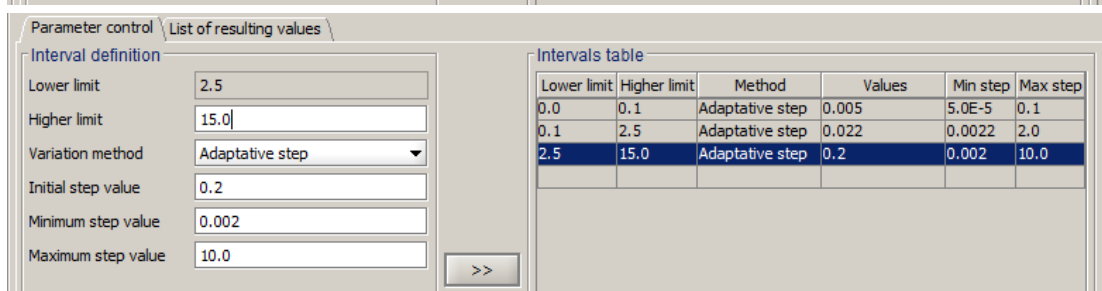
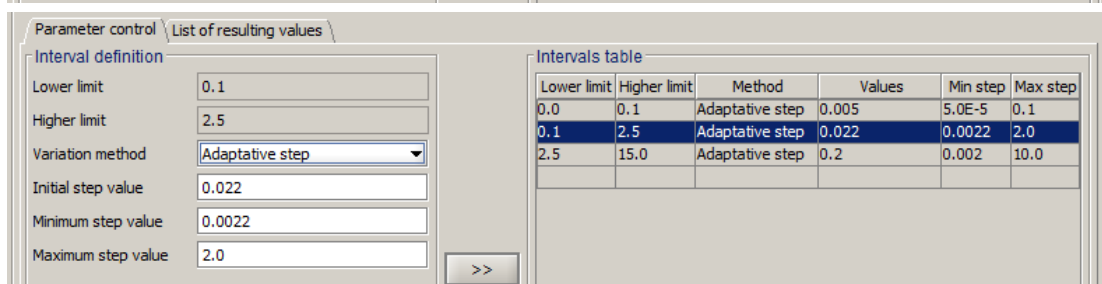
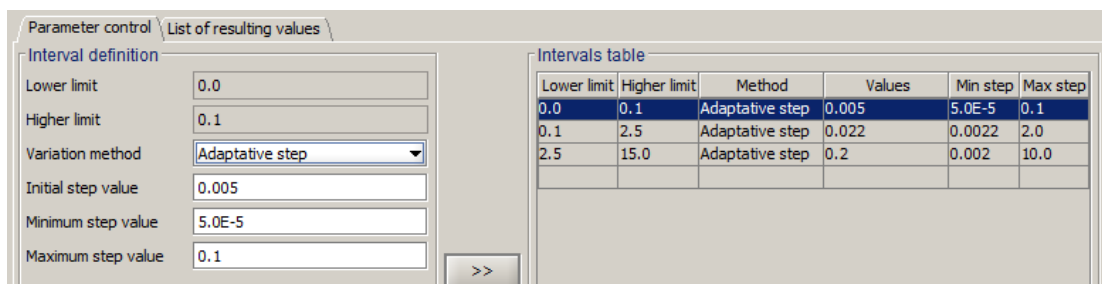


6.2 计算设置

修改“SCENARIO_1”，FRE 和 Voltage 取定值 50KHz 和 0V。



“SCENARIO_1” 里面选择 “Control by time”，时间参数设置如下图所示：



设置完之后，做网格检查和物理检查，没有问题的话，开始求解。如果有报错，根据报错信息和上述的设置信息仔细检查问题，直到通过网格检查和物理检查。

6.3 计算结果

求解结束后，察看计算结果。

在窗口的左下角，可以选择物理变量的具体值，选定后，则后续看到的后处理结果就是在此具体值的条件下计算出来的。

Information on the scenario

Scenario : ☒ SCENARIO_1

State of the scenario :
☒ Scenario fully processed

Information on the current computation step

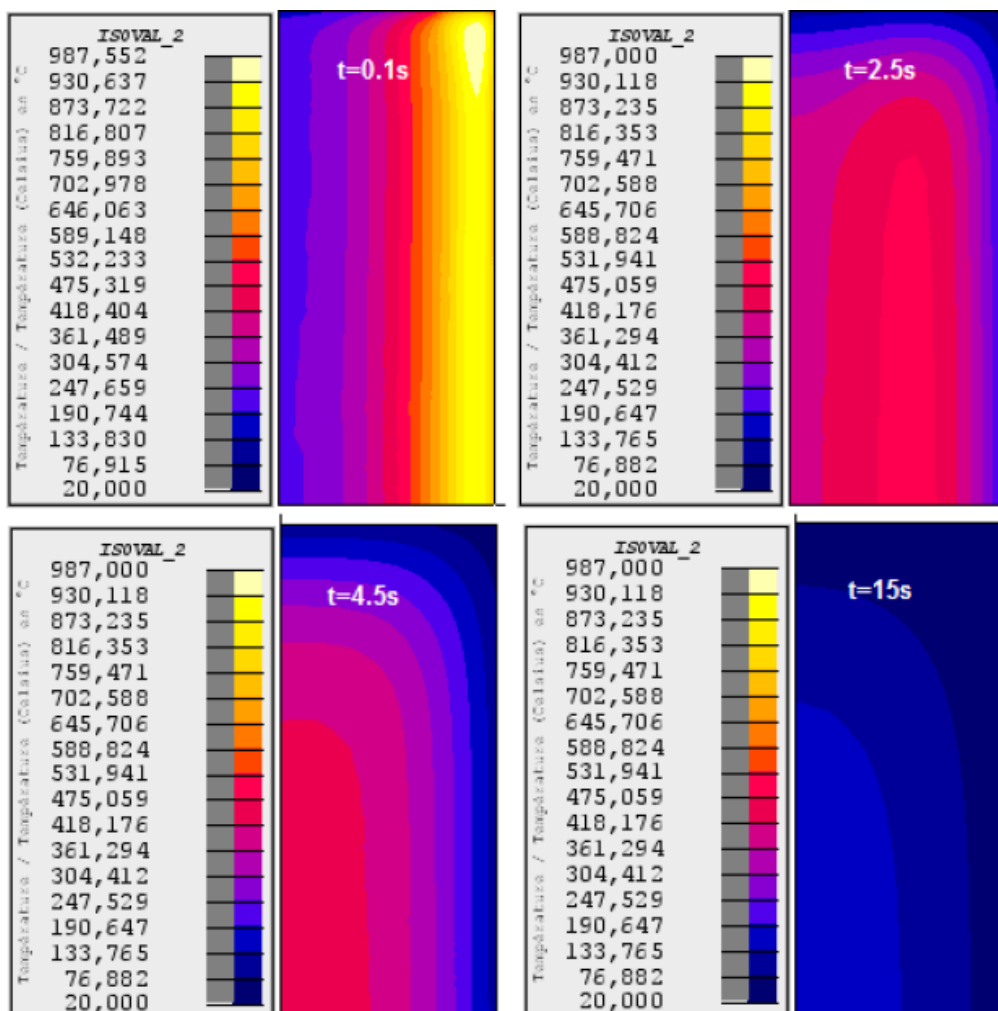
TIME : ☒ 15.0

State of the current computation step :
☒ Correctly solved

Select the step

6.3.1 瞬态温度计算结果

按照 4.3.2 中的方法得到以下 4 个时刻钢胚上的温度云图。这四个时刻分别是 0.1s, 2.5s, 4.5s 和 15s。

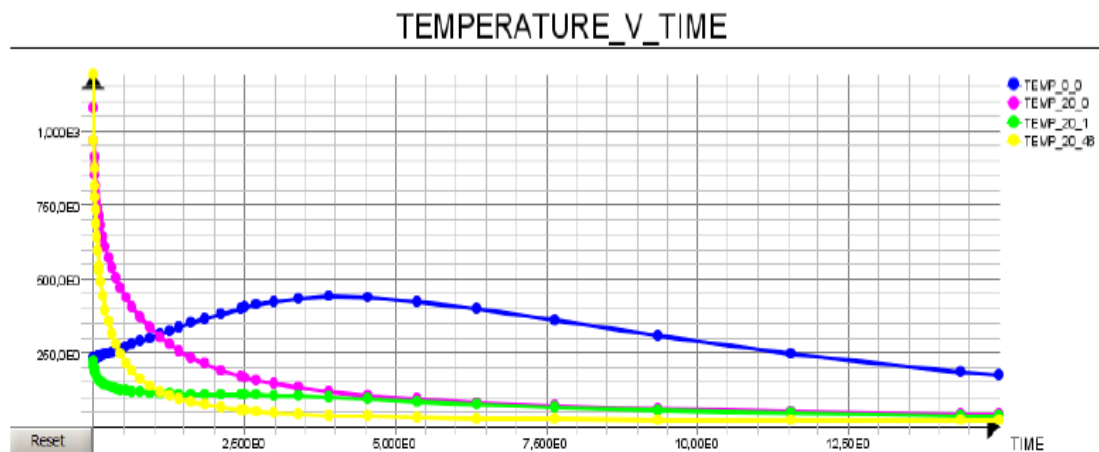


可以看出来，温度随时间在显著升高，并且热量在往里面传导。

6.3.2 单点温度变化曲线

参考 4.3.3 中的设置方法，得到钢胚的四个顶点的温度变化曲线，如下图所

示:



工况 4 计算结束，保存此 Project。