

---

二维电磁瞬态场-路耦合仿真软件 SiMAG (V3.0)

使用说明书

朱洒  
QQ 号: 747658302

2022. 8. 13

## 目 录

<b>1.</b>	<b>引言 .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>运行环境 .....</b>	<b>1</b>
<b>3.</b>	<b>正弦电流供电下 IPMSM 不考虑斜槽仿真详细教程 1</b>	
3.1.	步骤 1: gmsh 几何建模 .....	2
3.2.	步骤 2: 工作路径设定 .....	3
3.3.	步骤 3: 几何建模与网格剖分 .....	5
3.3.1.	Physical region 设置 .....	6
3.3.2.	气隙网格的设置 .....	7
3.3.3.	Sidelink 边界设置 .....	8
3.4.	步骤 4: 通过 Excel 文件输入模型参数 .....	9
3.4.1.	Excel 文件的准备与详细说明 .....	9
3.4.2.	Excel 转换为 txt 文件 .....	16
3.5.	步骤 5: 程序的运行 .....	17
3.5.1.	初始化 .....	17
3.5.2.	进行有限元计算 .....	18
3.5.3.	后处理查看结果文件 .....	18
<b>4.</b>	<b>案例教程 .....</b>	<b>21</b>
4.1.	案例一: 斜槽对反电势、力矩的影响 .....	21
4.1.1.	分段斜极与不分段斜极时的输入 TXT 文件对比 .....	23
4.2.	案例二: PWM 电源型逆变器供电仿真 .....	26
4.2.1.	空载瞬态场仿真确定 $d$ 轴超前 $A$ 轴的夹角 .....	27
4.2.2.	三相正弦电流源供电仿真 (快速插件) .....	28
4.2.3.	三相正弦电流供电下 $dq$ 轴磁链、电压快速计算插件 .....	30
4.2.4.	三相正弦基波电压 (插件快速生成) 供电下的计算 .....	31
4.2.5.	PWM 电压供电下的有限元计算 .....	34
4.3.	案例三: 细导线绕组 IPM 参数化扫描 .....	37
4.4.	通过 step 格式文件直接导入发卡绕组模型 .....	39
4.4.1.	运用快捷插件计算不同工况下绕组交流铜耗 .....	42
4.5.	PWM 线电压供电下对 Prius2017 进行瞬态有限元仿真 .....	43
4.5.1.	正弦电流供电下仿真确定 $d$ 、 $q$ 轴电压 .....	43
4.5.2.	PWM 电压生成与以 PWM 线电压为输入的瞬态有限元计算 .....	44
4.6.	考虑 PWM 谐波损耗的 Prius2017 效率图计算 .....	48
4.6.1.	参数化扫描 .....	48
4.6.2.	工作区分析 .....	49
4.6.3.	正弦电流供电下效率图计算 .....	53
4.6.4.	PWM 谐波损耗计算及 PWM 电压供电下效率图计算 .....	55
4.6.5.	近似计算磁滞损耗加速与并行计算加速 .....	61
4.7.	变压器供电仿真 .....	63
4.7.1.	Gmsh 几何建模 .....	63

4.7.2.	Simag383 初始设置 .....	69
4.7.3.	通过 Excel 文件输入模型参数 .....	69
4.7.4.	有限元计算 .....	79
4.7.5.	仿真结果分析 .....	80
4.8.	案例八: IPMSM 空载仿真 .....	82
4.8.1.	从 ANSYS 导出 .....	83
4.8.2.	Gmsh 几何建模 .....	84
4.8.3.	Simag383 初始设置 .....	94
4.8.4.	通过 Excel 文件输入模型参数 .....	94
4.8.5.	有限元计算 .....	105
4.8.6.	仿真结果 .....	107
<b>5.</b>	<b>瞬态场 Txt 文件说明 .....</b>	<b>109</b>
5.1.	对应于 basical parameters 工作表中的 txt .....	109
5.1.1.	Units.txt .....	109
5.1.2.	model.txt .....	109
5.1.3.	sidelink.txt .....	109
5.1.4.	Ini_pos.txt .....	109
5.1.5.	Mesh.txt .....	109
5.1.6.	torque_gap.txt .....	110
5.1.7.	PM_rot.txt .....	110
5.1.8.	Time0.txt .....	110
5.1.9.	Position.txt .....	110
5.1.10.	Bregion.txt .....	110
5.1.11.	fdvregion.txt .....	110
5.1.12.	skew.txt .....	111
5.2.	对应于 material 工作表中的 txt .....	111
5.2.1.	H_B.txt .....	111
5.2.2.	material.txt .....	112
5.2.3.	coef_loss.txt .....	113
5.3.	对应于 circuit 工作表的 txt 文件 .....	113
5.3.1.	Lpnode.txt .....	113
5.3.2.	stranded.txt .....	113
5.3.3.	solid.txt .....	114
5.3.4.	wind_solid.txt .....	115
5.3.5.	wind_stranded.txt .....	115
5.3.6.	Cur_S.txt .....	116
5.3.7.	CS_input.txt .....	116
5.3.8.	Vot_S.txt .....	117
5.3.9.	Vs_input.txt .....	117
5.3.10.	Res.txt .....	117
5.3.11.	Leak.txt .....	117
<b>6.</b>	<b>瞬态场计算中间过程无后缀文件说明 .....</b>	<b>117</b>
6.1.	初始化时生成的无后缀文件 .....	118
6.2.	计算过程中生成的无后缀文件 .....	121

<b>7.</b>	<b>瞬态场结果文件说明 .....</b>	<b>122</b>
<b>8.</b>	<b>时谐场计算模块 .....</b>	<b>124</b>
8.1.	时谐场计算参数设置 .....	124
8.1.1.	LPnode.txt .....	125
8.1.2.	Units.txt .....	126
8.1.3.	model.txt .....	126
8.1.4.	VP.txt .....	127
8.1.5.	material_TH.txt .....	127
8.1.6.	Solid.txt .....	127
8.1.7.	Bregion.txt .....	127
8.1.8.	coef_loss.txt .....	128
8.1.9.	Cur_S.txt .....	128
8.1.10.	Freq_all.txt .....	128
8.1.11.	Ini_pos.txt .....	128
8.1.12.	Leak.txt .....	129
8.1.13.	Mesh.txt .....	129
8.1.14.	Model.txt .....	129
8.1.15.	position.txt .....	130
8.1.16.	Res.txt .....	130
8.1.17.	Rot_judge.txt .....	130
8.1.18.	Sidelink.txt .....	130
8.1.19.	Stranded.txt .....	131
8.1.20.	Solid.txt .....	131
8.1.21.	Vot_S.txt .....	131
8.1.22.	VS_input.txt .....	132
8.1.23.	VP.txt .....	132
8.1.24.	Wind_stranded.txt .....	132
8.1.25.	Wind_solid.txt .....	132
8.2.	时谐场计算 .....	132
8.3.	<i>dq</i> 轴谐波电压快捷输入插件 .....	133
<b>9.</b>	<b>Python 脚本驱动功能 .....</b>	<b>134</b>
<b>10.</b>	<b>注意事项和常见错误 .....</b>	<b>134</b>

## 1. 引言

继 2020 年推出 SiMAG1.0 之后，经过一年断断续续的发展，在 2021 年又将软件升级至 2.0 版本，并将软件重新命名为 SiMAG2.0。新版本软件与之前主要的不同主要体现在两个方面，一方面是 exe 文件的数量大大减少，这样尽可能的将数据放在内存中，通过动态内存分配可以减少文件读取的时间提高计算速度；另一方面是采用一个 EXCEL 代替了原来十多个的 txt 文件，使得参数输入更加方便。

为了满足斜极、斜槽的仿真需求，在 SiMAG3.0 中新加入了斜极、斜槽的 2.5D 仿真功能，无论是转子斜极还是定子斜槽都可通过将转子偏移一定角度的多个二维模型串联起来实现。此外，新增了三相正弦电压、PWM 电压自动生成功能，这样就不需要借助 simulink 仿真，可直接生成三相 PWM 电压。另外，将之前的参数化扫描功能也加入其中，形成了相对完备的计算软件。

此外，为了实现基于频域小信号分析的永磁电机 PWM 谐波损耗快速算法，将二维线性时谐场-路耦合的功能也融入其中，并且针对三相 IPMSM 开发了许多快捷插件，这些插件有的也可用于其它三相电机，用户可灵活使用。

## 2. 运行环境

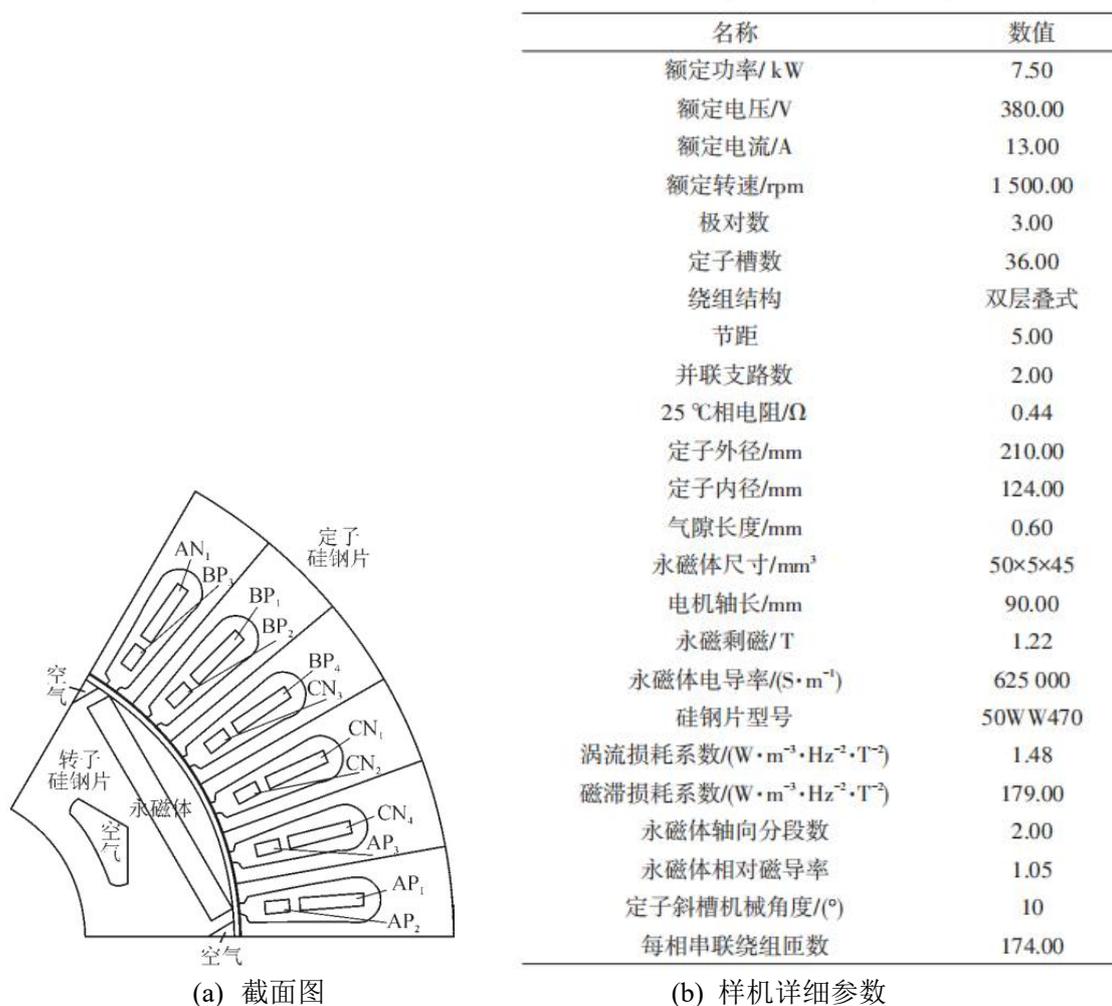
前后处理软件：gmsh（目前本软件不含前后处理功能，所以借助第三方开源软件 gmsh，后期寻找合作进行替换。目前本软件的使用者需要对 gmsh 的操作有一定了解）

直接将 SiMAG3.0 文件夹复制到电脑任意一个位置，打开文件夹，运行 SiMAG3.0.exe 即可开始使用软件。

## 3. 正弦电流供电下 IPMSM 不考虑斜槽仿真详细教程

这教程被放在了 tutorial\_3.0\IPM\_SCS\_noskew 中。

在介绍各个文件的意义之前，我们直接以一台内嵌式永磁同步电机（IPMSM）模型为例讲解软件的使用过程，后面再详细介绍各个文件的作用。如图 3-1 所示为一个 IPMSM 样机，在进行有限元建模时，第一步必然是几何建模。我们直接采用 gmsh 进行绘图，gmsh 可以实现完全参数化建模和网格质量的灵活控制。这个电机是斜槽的，我们为了简化问题，先忽略斜槽，再在下一章专门将斜槽处理。


 图 3-1 IPMSM 电机示意图<sup>[1]</sup>

### 3.1. 步骤 1: gmsh 几何建模

这部分操作可以完全脱离 SiMAG 进行, 直接通过 gmsh 进行。关于 gmsh 的下载和操作可以参考[3], 在此不再赘述。我们将事先准备好的 test.geo、para.geo 和 xinzhunazi.geo 放在了 tutorial\_3.0\IPMSM\_SCS 下, 按照图 3-2 所示的方式可直接用 gmsh 打开 geo 文件。xinzhunazi.geo 只包含了转子几何模型, 而 test.geo 是最主要的 geo 文件(可以理解为主程序, 以下简称主 geo 文件), 其中 include 了 xinzhuanzi.geo, 通过 gmsh 打开 test.geo 可以得到完整的电机模型。这样若想只改变转子结构, 则修改 xinzhuanzi.geo 就可以了。另外, 还准备了 para.geo, 这个 geo 文件用来专门保存可变参数, 方便后面进行参数化扫描和优化, 在此处无需使用。对于 gmsh 不熟悉的用户可以先不着急学习 Gmsh 建模, 先用我们准备好的文件进行操作。

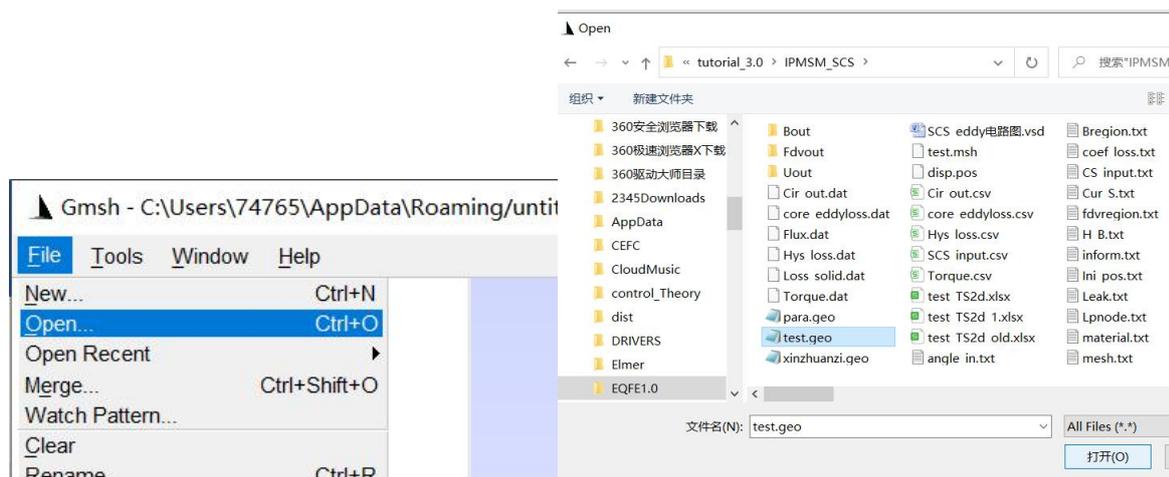


图 3-2 直接通过 gmsh 打开几何模型 geo 文件

### 3.2. 步骤 2：工作路径设定

新建一个空文件夹作为工作路径（workpath），如本教程中设定 workpath 为 C:\EQFE1.0\PMSM\code\_ornized3\tutorial\_3.0\IPM\_SCS\_noskew，将三个 geo 文件复制到 workpath 中，如图 3-3 所示。

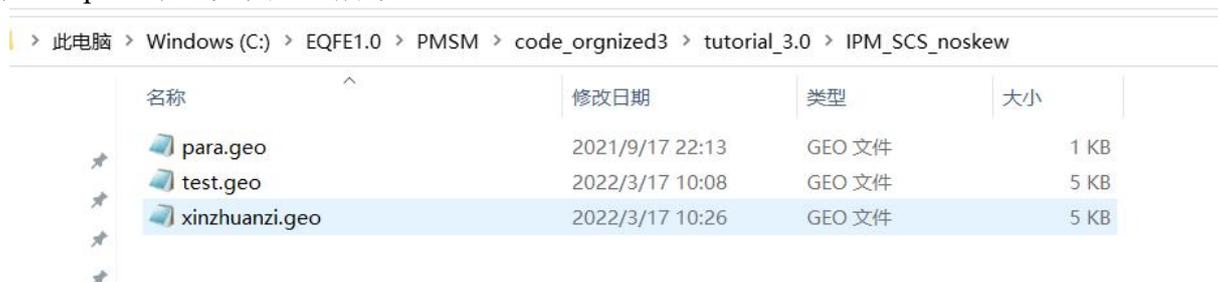


图 3-3 工作文件夹路径

然后从 Simag3.0 文件夹中，双击运行 Simag3.0.exe 得到如图 3-4 所示的软件操作界面。然后单击“设置工作目录”按钮，将当前工作路径设置为 C:\Project\yiduo\IPMSM\_SCS，单击“锁定”复选框，防止误操作修改了路径名称。并且可以通过单击“New\Open”可以打开 workpath，方便查看工作目录下的文件，此外将主 geo 文件名修改为和文件夹中一致的 test.geo，如图 3-5 所示。para.geo 暂时不需要使用，使用默认即可。

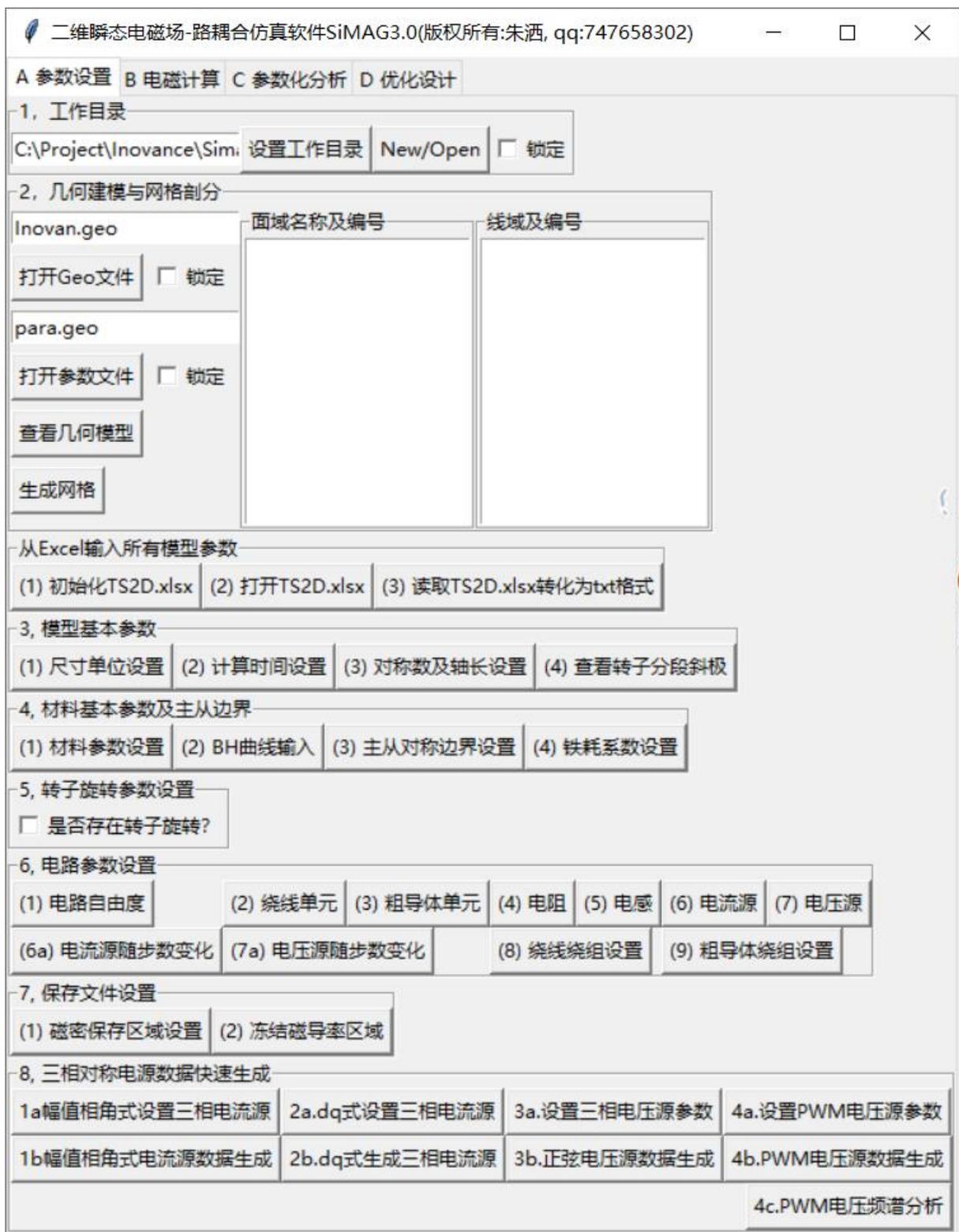


图 3-4 SiMAG3.0 操作界面

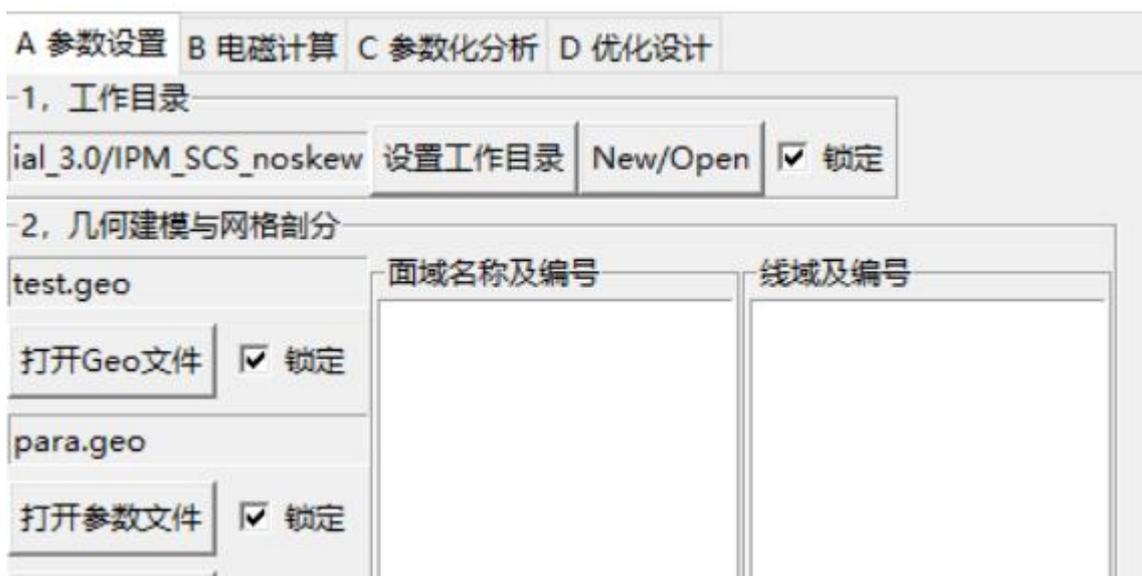


图 3-5 SiMAG3.0 设置工作路径与主 geo 文件名

### 3.3. 步骤 3：几何建模与网格剖分

在第一个文本输入框中输入主 geo 文件名，这个名称任意但是需要与当前路径中所存放的主 geo 文件名一致。点击“锁定”防止名称被误修改，点击“打开 Geo 文件”按钮可以查看当前 test.geo 文件名，如图 3-6 所示。这个时候可以任意修改 test.geo 中的内容，以修改几何模型。但是需要注意的是，必须先关闭 test.geo 之后，再进行本软件的其他操作，否则很容易死机。在打开后面的 gmesh 界面或 excel 文件时也是类似的。我们建议直接通过 gmesh 完成几何建模，准备好已经需要的 geo 文件再拷贝到 workpath 中直接进行剖分和计算。对于 para.geo 文件的操作和 test.geo 的操作类似。这个教程里还不涉及到优化，所以 para 的内容。当需要进行几何模型参数扫描和优化时将可变参数放到这个文件中，然后在主 geo 文件中 include para.geo 就可以实现只修改 para.geo 文件来修改整个几何模型。

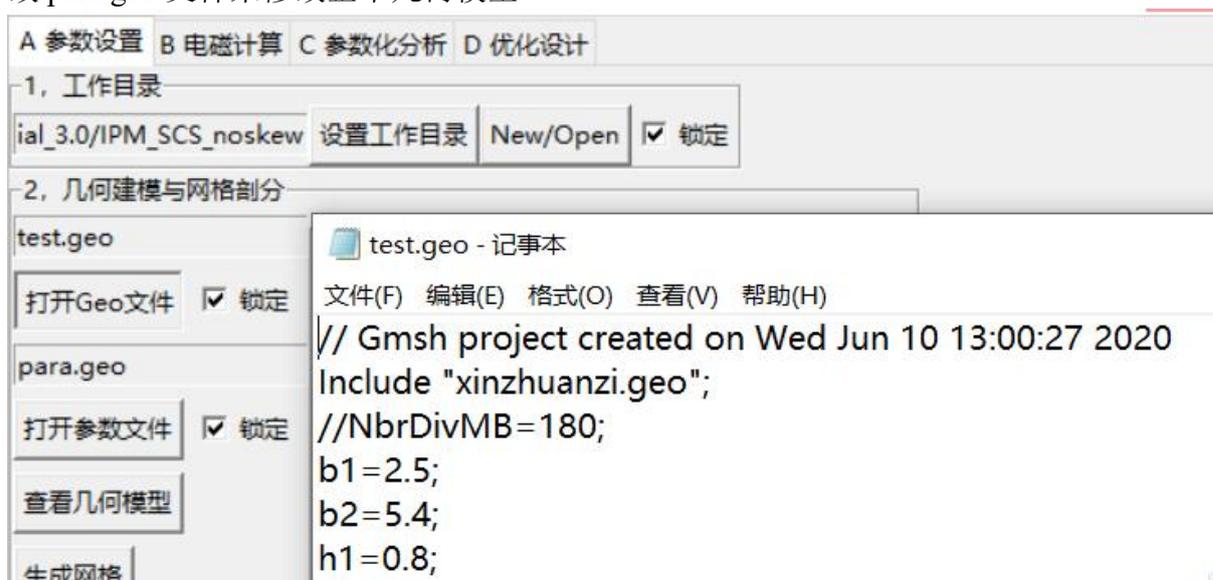
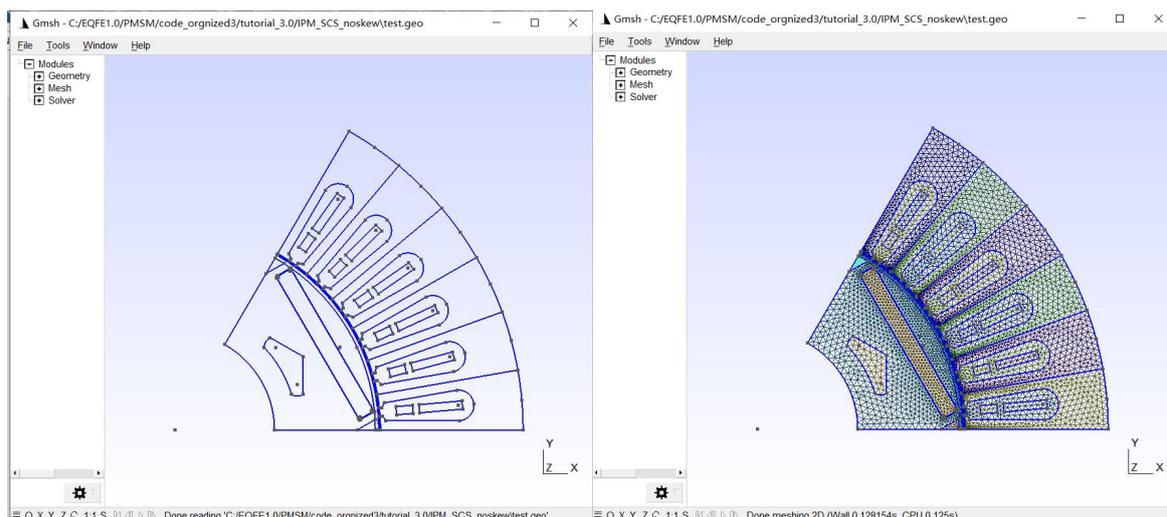


图 3-6 打开查看 test.geo 文件

点击“查看几何模型”按钮，这时候就相当于在底层调用 gmesh 读取了 test.geo 文件，并打开，如图 3-7(a)所示。在键盘上按下数字 2（这是 gmesh 中进行 2 维网格剖分的快捷键），可以得到模型网格如图 3-7(b)所示。



(a) 几何模型文件 (b) 网格剖分

图 3-7 打开查看 test.geo 文件

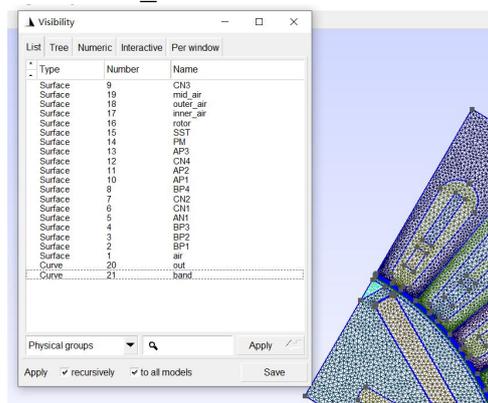
显然不是任意的几何模型都是可以采用本软件进行计算，为了能使用 SiMag3.0 进行旋转电机计算需要在 geo 文件中满足如下要求。

### 3.3.1. Physical region 设置

所谓 Physical region 就是将具有相同属性的几何区域组合在一起，这样在有限元模型中对于不同的物理域就可以设置不同的参数。在 gmsh 的界面中点击 tools->visibility 可以看到图 3-8(b)中的内容，这对应于在 test.geo 中设置的情况，如图 3-8(a)所示。在 gmsh 的界面里，可以选择不同的 physical region，然后点击“Apply”就可以单独查看这个 physical region。选择不同 physical region 时，同时按住键盘上的 Ctrl 键可以同时选择多个 region，如图 3-9 所示。SiMag 中用到的 physical region 主要分为 Physical Surface 和 Physical Curve 两种。本模型中共有 19 个 Physical Surface 和 2 个 Physical Curve，他们的作用如表 1 和表 2 所示。为了避免不必要的 bug，所以物理面必须从 1 开始编号，且编号为 1 的材料必须是空气，中间层气隙（四边形）的编号在最后，所有编号必须连续，因为后面需要对每个域设置参数。物理线的编号不需要从 1 开始，软件里是通过 Physical Curve 的名称来识别线。第一类边界线被命名为 out, 用于实现转子自动旋转的边界线(mid\_air 和 inner\_air 的交接线)并命名为 band。

```
Physical Surface("air", 1) = {1,2,5,6,248,209,170,131,92,9};
Physical Surface("BP1", 2) = {266};
Physical Surface("BP2", 3) = {232};
Physical Surface("BP3", 4) = {227};
Physical Surface("AN1", 5) = {271};
Physical Surface("CN1", 6) = {154};
Physical Surface("CN2", 7) = {149};
Physical Surface("BP4", 8) = {193};
Physical Surface("CN3", 9) = {188};
Physical Surface("AP1", 10) = {11};
Physical Surface("AP2", 11) = {10};
Physical Surface("CN4", 12) = {115};
Physical Surface("AP3", 13) = {110};
Physical Surface("PM", 14) = {4};
Physical Surface("SST", 15) = {233,194,155,116,77,8};
Physical Surface("rotor", 16) = {3,7};
Physical Surface("inner_air", 17) = {273};
Physical Surface("outer_air", 18) = {274};
Physical Surface("mid_air", 19) = {272};
Physical Curve("out", 20) = {20,236,237,197,198,158,159,119,120,81,80,34,36};
Physical Curve("band", 21) = {1000};
```

(a) test.geo 文件中设置的 physical region



(b) gmsh 中的不同 physical region

图 3-8 Physical region 说明

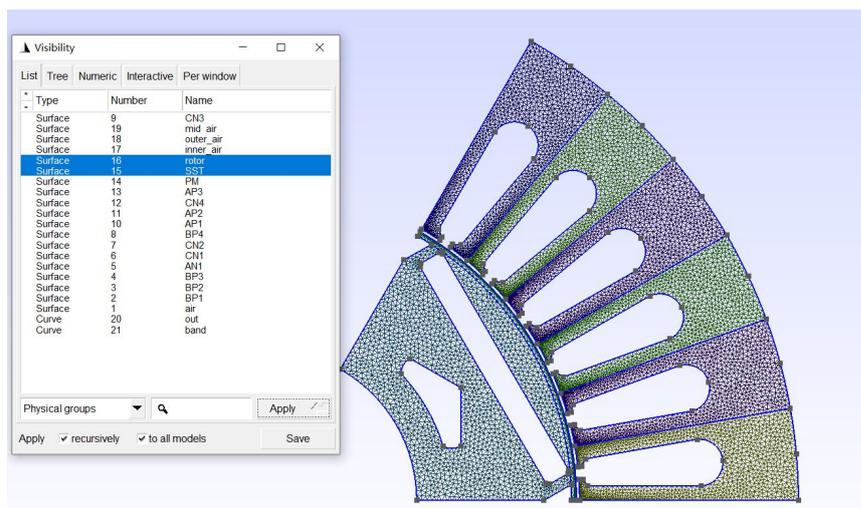


图 3-9 定、转子硅钢片的物理域  
表 1 19 个 Physical surface 的定义及编号

名称	编号	物理意义
Air	1	除了气隙之外的所有空气域
AN1, AP1, AP2, AP3	5,10,11,13	A 相绕组
BP1, BP2, BP3, BP4	2,3,4,8	B 相绕组
CN1, CN2, CN3, CN4	6,7,9,12	C 相绕组
PM	14	永磁体
SST	15	定子硅钢片
rotor	16	转子硅钢片
inner_air	17	内层气隙
out_air	18	外层气隙
mid_air	19	中间层气隙（四边形）

表 2 2 个 Physical curve 的定义及编号

名称	编号	物理意义
out	20	施加第一类边界条件
band	21	mid_air 和 inner_air 的交接线

### 3.3.2. 气隙网格的设置

在本软件中采用和 JMAG 中类似的技术，即将中间气隙层采用四边形网格，使用 Moving band 的技术来是新转子任意角度的旋转[4]，气隙网格的剖分如图 3-10(a)所示。在剖分时，mid\_air 必须采用等距四边形剖分，也就是每个四边形的大小必须相等。实现这种剖分方式的命令在图 3-10(b)中，具体的需要先掌握一定的 gmsh 使用技巧。

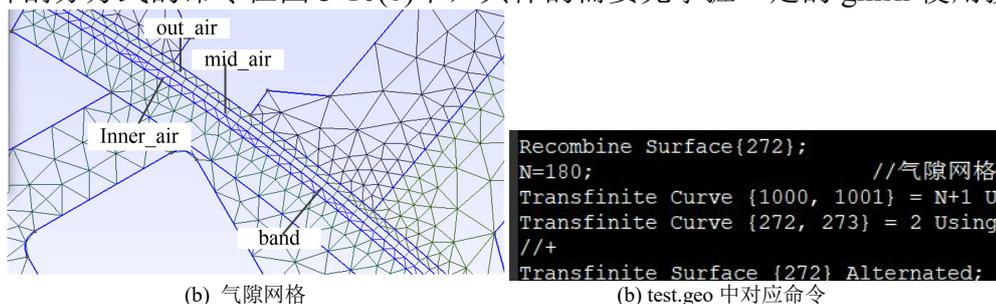


图 3-10 中间气隙层设置

### 3.3.3 Sidelink 边界设置

所谓的 side-link 边界类似于 Maxwell 中的 Master-slave (主从)边界和 JMAG 中的 rotation symmetry (旋转对称) 边界。由于只取电机的 1/6 模型, 在旋转对称边界上约束对应点的自由度相等或相反即可实现旋转周期对称边界条件或者时旋转反周期对称边界条件的设置。为此, 需要在 side 边界线上和 link 边界线上的剖分完全一致, 如图 3-11 所示。为了实现剖分的完全一致, 需要在边界线的网格控制上使用 gmsh 中的 Transfinite Line 的命令去将对应边界上线网格剖分的完全一致。有的时候即使不加这样额外的控制, 而几何模型采用旋转对称的方式建立, gmsh 自动剖分的网格有时候会自动满足 side 边和 link 边上的剖分完全一致, 具体在后面初始化模型时, 会在控制台中提示 side-link 边上的剖分是否正确。

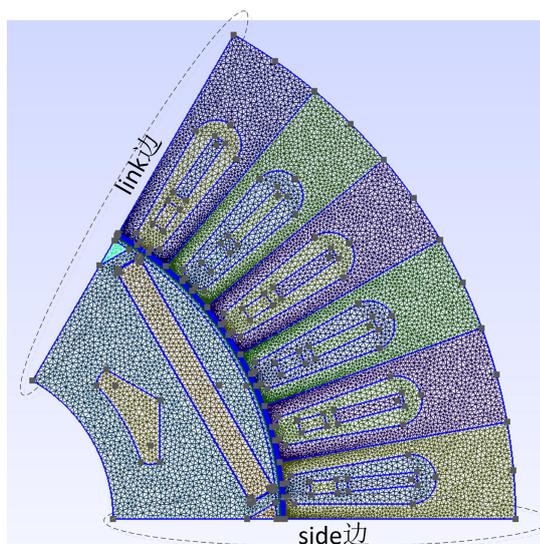


图 3-11 side-link 边界线

单击“生成网格”按钮, 如果 gmsh 中的建模完全正确, 会在右面显示出各个面和线域的名称和编号。另外, 单击“New/Open”按钮, 会打开当前工作目录, 这时候会发现工作目录中出现了多出了 test.msh 文件。这个就是 gmsh 进行网格剖分后得到的网格数据文件。这个网格数据文件的名称和主 geo 文件一致, 扩展名为.msh。文件的格式为 gmsh 中 2.2 的格式, 该文件可以打开, 具体的里面格式参照[3]中的说明手册。对应底层 Python 命令为:

```
os.system(self.path_exe+"\\"+"gmsh "+self.geo_file+" -2 -format msh22")
其实就直接调用 gmsh 将.geo 文件转化为.msh 文件。
```



图 3-12 网格文件生成

### 3.4. 步骤 4: 通过 Excel 文件输入模型参数

在 1.0 版本的软件中需要通过十多个 txt 文件来输入有限元仿真所需的各个参数，在采用 txt 输入时，没有相应的提示，初学者很难使用。在 2.0 版本的软件中我们通过 excel 进行输入，并且再输入界面上给与用户一定的提示，更加方便操作。在 3.0 版本中为了满足斜槽的要求和粗导体仿真，Excel 输入文件的格式与之前发生了一定的变化，这就导致两者格式上不兼容。我们后面都以 3.0 的格式为准。

#### 3.4.1. Excel 文件的准备与详细说明

单击“(1) 初始化 TS2D.xlsx”按钮，打开 workpath 会发现其中多出了一个名为 test\_TS2d.xlsx 的 excel 文件。这个文件的命名规则为主 geo 文件名+“\_TS2d.xlsx”。再点击“(2) 打开 TS2D.xlsx”按钮就会打开这个 excel 文件，如图 3-13 所示。用户只需要按照约定的规则在这个文件中输入有限元计算所需的所有参数即可。当所有的数据输入好了之后，保存并关闭这个 Excel 文件之后。如果用户想先快速熟悉软件的操作流程，可以直接将 tutorial/test\_TS2d.xlsx 复制到当前工作目录下即可。点击“(3) 读取 TS2D.xlsx 转化为 txt 文件”按钮即可将 Excel 中的数据转化为程序计算所需的所有 txt 文件。如图 3-14 所示，将进行 excel 文件初始化与输出 txt 的脚本放在了 Ini\_param.py 文件和 Out\_param.py 两个文件中。

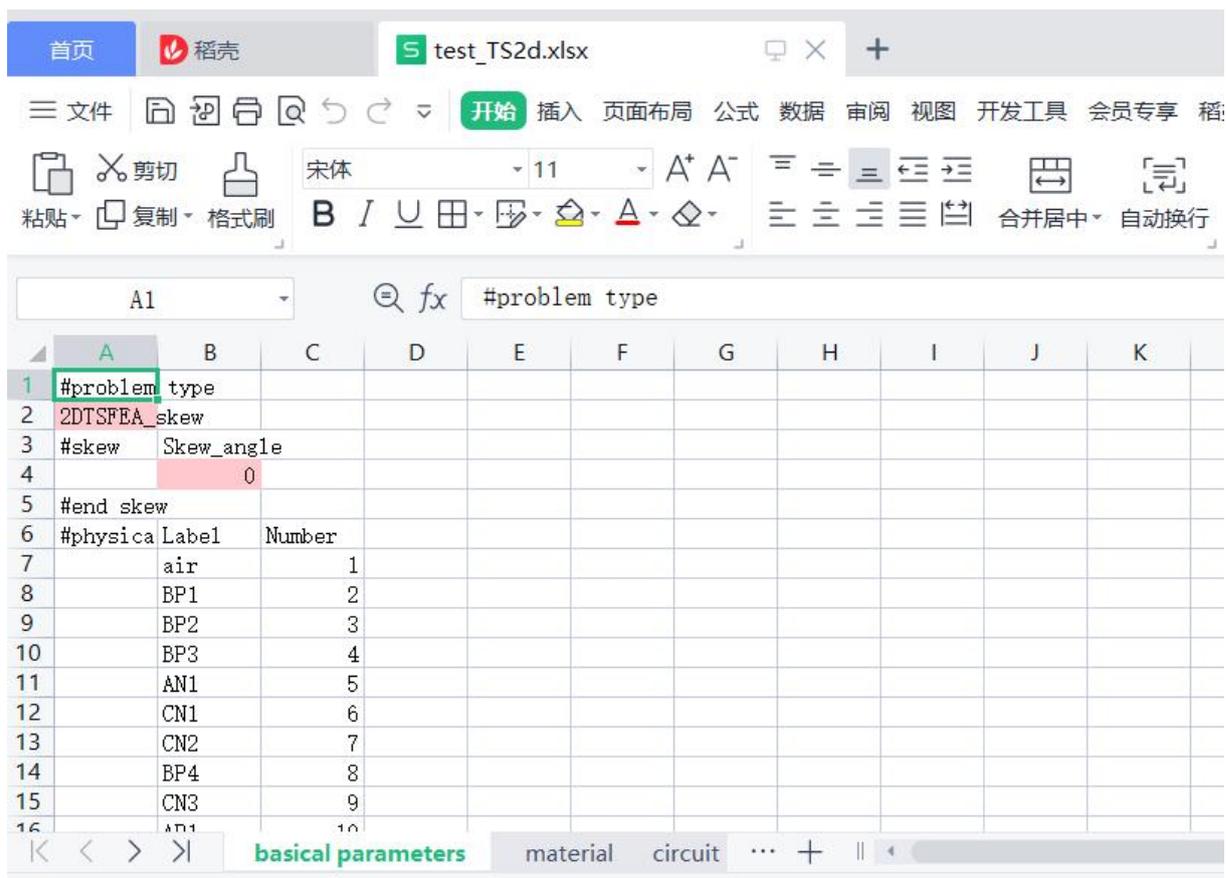


图 3-13 \*\_TS2d.xlsx

Excelpara.initialize() #初始化 Excel 类中的 initialize()函数，对应“(1) 初始化 TS2D.xlsx”按钮

Excelpara.openexc() #初始化 Excel 类中的 initialize()函数，对应“(2) 打开 TS2D.xlsx”按钮

Exceltotxt.output\_all() #输出 Excel 参数类中的 output\_all()函数，对应“(3) 读取 TS2D.xlsx 转化为 txt 文件”

```
from Ini_param import Excelpara #初始化excel所需要的类
from Out_param import Exceltotxt #讲excel的数据输出到txt文件中
```

图 3-14 Excel 文件初始化与输出 txt 对应的类

下面就参照 tutorial/test\_TS2d.xlsx 中已经准备好的例子进行讲解。首先 Excel 文件被分为了 3 个 sheet: Basic parameters, material 和 circuit, 他们的意义如其名, 分别如图 3-15, 图 3-16 和图 3-24 所示。其中#打头的每一小段内容都对应于一个 txt 文件。对于不定长的数据, 都有一个 end 符来标识。生成的 txt 文件的详细说明会在下文中给出。

#problem type下面保存的的问题类型，不用更改，这里把所有问题都当成转子斜极处理。如果不斜极只需要将 Skew\_angle设置为0即可。则插入行后依次写入斜极角

#problem type		
2DTSFEA_skew		
#skew	Skew_angle	0
#end skew		
#physical region	Label	Number
	air	1
	BP1	2
	BP2	3
	BP3	4
	AN1	5
	CN1	6
	CN2	7
	BP4	8
	CN3	9
	AP1	10
	AP2	11
	CN4	12
	AP3	13
	PM	14
	SST	15
	rotor	16
	inner_air	17
	outer_air	18
	mid_air	19
\$send physical region		
#units	units	mm
#model	Symmetry num	Axial_length(mm)
	6	90
#sidelink	Isexist?	Master arSlave angle

以#physical region开始， \$send physical region为结束，中间保存了每个物理域的编号，这个由单击“(1)初始化 TS2D.xlsx”自动生成。用户也可根据问题变化进行修改。用\$send physical region约定问题结束。这里其实是相当于建立了物理域和编号之间的对应关系，这样就后面填写excel的时候就可以直接写名称，程序自动转化为编号，这样易用性更好。

模型单位，对应生成units.txt。

模型对称数和轴向长度对应生成model.txt。

(a) 上半部分

27	#units	units	mm
28	#model	Symmetry num	Axial_length(mm)
30		6	90
31	#sidelink	Isexist?	Master arSlave angle(°)
32		Yes	0 60 -1
33	#Ini_pos	Rotor initial	mechanical position(°)
34			0
35	#gap mesh	Mesh number	Total mechanical angle(°)
36		180	60
37	#torque region	Region Labels...	
38		inner_air	outer_air
39	#isrotation	#Is rotation?	
40		Yes	
41	\$rotor PM	Pyhsical Reg	MagnetizeBr(T)
42		PM	30 1.22
43	\$end rotor PM		
44	#Time0	Start Time(m	End Time
45		0 19.83333	0.16666667
46	#Position	Start Positi	Position
47		0	1 120
48	#Bregion	Coordinate t	Region Labels...
49		2	outer_air
50	#fdvregion	type (1: FDR	Region Labels...
51		1	SST rotor
52			

#sidelink对应sidelink.txt.四个参数分别指示sidelink边是否存在，主边与x轴夹角，从边与x轴夹角，周期边界类型（1表示周期边界，-1表示反周期边界）

转子初始时刻角度，用于考虑分段斜极影响，对应ini\_pos.txt。

60°的圆周被平均分成了180个，每个四边形的张角为1/3°，这个数据保存在了对应mesh.txt中。

对应torque\_gap.txt,保存用于计算转矩的气隙区域

对应PM\_rot.txt.首先在is rotation? 下面填写是否存在转子旋转（Yes or No）；另外如果转子上存在永磁体，则填写\$rotor PM与\$End rotor PM之间的内容。

对应Time0.txt, 分别表示起始时间（统一设置为0），结束时间，时间步长（单位ms）。

对应Position.txt, 分别表示起始位置（统一设置为0），位置步长和总步数。

对应Bregion.txt, 第一个参数表示坐标系类型，第二个参数表示所需保存磁密的区域，...表示后面还可以继续加多个区域，不止是可以保存一个区域磁密。

对应fdvregion.txt,冻结磁导率的类型和需要保存磁导率的区域,如果没有需要保存的区域可以不填

(b) 下半部分

图 3-15 Basical parameters 表单中的内容说明

	A	B	C	D	E	
1	#BH_curv	Label	Magnetic field	Flux density		
2	\$BH	35DW333	H(A/m)	B(T)		
3			0	0		
4			17.50302952	0.046759997		
5			35.1349457	0.140214511		
6			42.02974878	0.219317629		
7			49.02921044	0.341108262		
8			58.06578983	0.51689606		
9			62.06226989	0.589439907		
10			68.06540516	0.689692266		
.....						
38			86280.31061	2.088892071		
39			103914.7958	2.111052219		
40	\$end BH					
41	\$BH	50DW470	H(A/m)	B(T)		
42			0	0		
43			58	0.4		
44			60	0.45		
45			62	0.5		
.....						
74		23090	1.95			
75		30892	2			
76		47771	2.05			
77		74045	2.1			
78	\$end BH					
79	#end BH_curves					
80	#material	Region	Relative perm	Current dens:Br(T)	Magnetiz	Conductivity (S/m)
81		air	1	0	0	0
82		BP1	1	0	0	0
83		BP2	1	0	0	0
84		BP3	1	0	0	0
85		AN1	1	0	0	0
86		CN1	1	0	0	0
87		CN2	1	0	0	0
88		BP4	1	0	0	0
89		CN3	1	0	0	0
90		AP1	1	0	0	0
91		AP2	1	0	0	0
92		CN4	1	0	0	0
93		AP3	1	0	0	0
94		PM	1.05	0	1.22	30 625000
95		SST	50DW470	0	0	0
96		rotor	50DW470	0	0	0
97		inner_ai	1	0	0	0
98		outer_ai	1	0	0	0
99		mid_air	1	0	0	0
100	#end material					
101	#coef_iron	Region	Eddy current	Hysteresis loss	coefficients (W/m3/Hz/T2)	
102		SST	1.4	250		
103		rotor	1.4	250		
104	#end coef_iron					

从#BH\_curves到#end BH\_curves 对应于H\_B.txt中的内容。在\$BH 与\$end BH之间可与插入一组硅钢片BH曲线，可以插入多组\$BH 与\$end BH的组合，根据程序中的规定可以插入最多5组数据，每组BH曲线的点数不超过100，这应该足够满足工程应用。通过Label中的名称来标识每种材料。

对应于material.txt. 六个参数分别为: physical region名, 相对磁导率(对于非线性材料, 这里直接用非线性材料的名称), 电流密度, 剩磁, 磁化方向, 电导率。注意这里的绕线区域虽然是铜, 但是作为细导线区域时, 其电导率为0.

对应coef\_loss.txt, 保存需要计算铁耗区域的铁耗系数, 也就是涡流损耗系数和磁滞损耗系数.

图 3-16 Material 表单中的内容说明

在介绍 circuit 表单之前，有必要先给出三相正弦供电下的电路，如图 3-17 所示，这个电路图在文献[1]中也已经给出。在图中有限元区域和电路区域通过细导线区域和粗导体区域联系起来，具体的原理详见[1]。在场-路耦合计算中，电路中的电流、电压和流过有限元区域中的磁位都是共同作为未知量，联立求解的。为了和 circuit 表单中的内容对应，我们还是重新把各个元件与电路中自由度关联情况梳理一下。首先看图 3-17 中，V1, V2, .....V12, V25, V26 表示电路中不同节点的电压。I13, I14.....I24

表示电路中不同区域待求解的电流。尽管很显然，I13, I14, I15, I16 是相等的，但是为了便于输入任意结构的电路，还是分别采用不同的自由度进行表示与不同的有限元区域相关联，尽管最后求得的这几个电流必然是相等的。从这个电路图中可以看出，电路中一共有 26 个自由度，这就意味着待求解的总自由度增加了 26 个。下面对电路中的不同元件与电路中不同自由度的关联关系进行简单介绍。

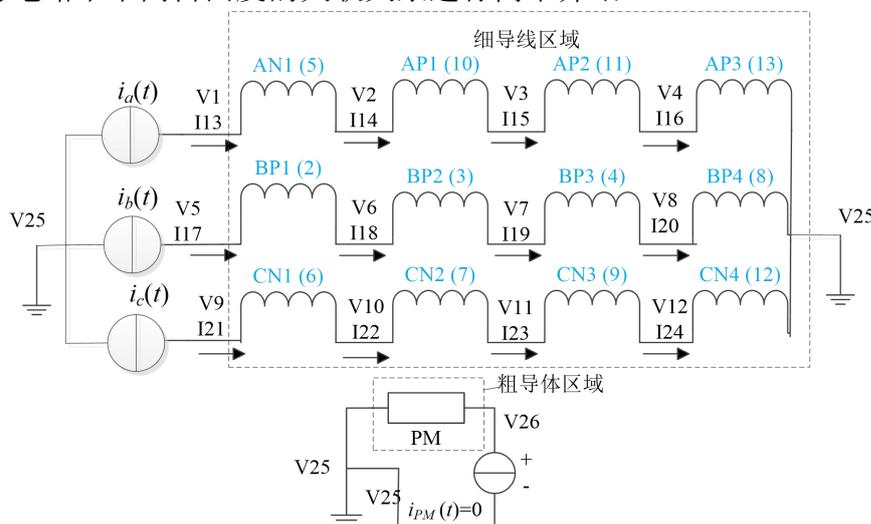


图 3-17 三相正弦电流源供电情况下的电路图<sup>[1]</sup>

(1) 细导线单元 (#strand) :

细导线单元是指不考虑涡流反应的绕组区域，用于关联电路和有限元区域，一个绕组单元关联电路中的三个自由度，分别为两端电压 V1、V2 和绕组电流 I12，如图 3-18 所示。I12 表示电流是从 1 流向 2 的，在有限元区域中电流可能是垂直于纸面流入或流出，方向用+1 或者-1 标识。

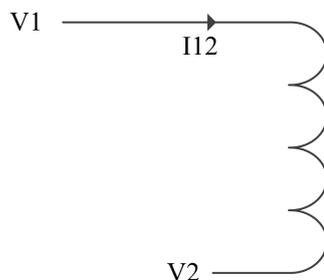


图 3-18 细导线 (stranded) 单元示意图

(2) 粗导体单元(#solid):

粗导体是指考虑其中内部涡流反应的导体单元，它只与两端电压关联，分别为 V1 和 V2 如图 3-19 所示。在有限元区域中电流可能是垂直于纸面流入或流出，方向用+1 或者-1 标识。



图 3-19 粗导体(solid)单元示意图

(3) 电流源(#Cur\_S)

电流源的电流表示从节点 1 流向节点 2 的电流，如图 3-20 所示。对于电流源来说电流是作为已知量进行输入，与电路关联的电压 V1 和 V2 待求解。

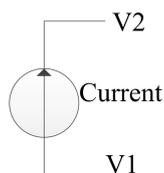


图 3-20 电流源示意图

(4) 电压源(#Vot\_S)

电压源的电压表示从节点 1 相对于节点 2 的电压，如图 3-21 所示。对于电压源来说电压是作为已知量进行输入，与电路关联的电压 V1 和 V2 以及电流 I12 待求解。

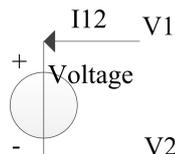


图 3-21 电压源示意图

(5) 电阻(#Res)

保存电阻单元信息，电阻电路图如图 3-22 所示，它只与电路中的两个节点电压相关联。绕组的电阻可以直接通过 strand 中的属性进行设置，无需另外再用电阻单元。这样的电阻单元主要用于模拟电路中串联了。

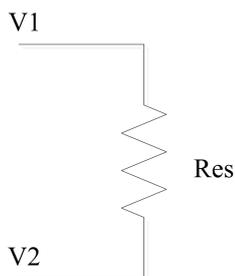


图 3-22 电阻示意图

(6) 电感(#Leak)

电感单元如图 3-23 所示。它与电路中关联的物理量包括电压 V1，V2 和从 1 流向 2 的电流。另外，电感值和电感中的初始电流将作为电感单元的属性。这样的单元多用于模拟电机的端部漏感。

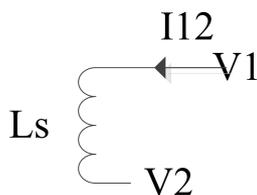


图 3-23 电感示意图

当前版本的软件仅支持这六种电路元件所构成的电路，通过这六种单元的组合基本上可以满足电机所需的仿真需求，即使是模拟 PWM 电压供电的计算工况，只需要将 PWM 电压输入进行电压源进行仿真即可。这就需要在 #CS\_input 和 #VS\_input 中输入随计算步数或者是转子位置变化的电压源信息和电流源信息即可。此外，为了方便计算磁链还增加了 #winding\_stranded 和 #winding\_solid 来表示电机一整个绕组和各个细导线单元区域的关联关系。基于上面的说明，对 circuit 表单中的内容进行详细解释，如图 3-24 所示。

	A	B	C	D	E	F	G
1	#Lpnode	Node num	Id0	Disp0	Type		
2		1	1	0	Vot		
3		2	1	0	Vot		
4		3	1	0	Vot		
5		4	1	0	Vot		
6		5	1	0	Vot		
7		6	1	0	Vot		
8		7	1	0	Vot		
9		8	1	0	Vot		
10		9	1	0	Vot		
11		10	1	0	Vot		
12		11	1	0	Vot		
13		12	1	0	Vot		
14		13	1	0	Cur		
15		14	1	0	Cur		
16		15	1	0	Cur		
17		16	1	0	Cur		
18		17	1	0	Cur		
19		18	1	0	Cur		
20		19	1	0	Cur		
21		20	1	0	Cur		
22		21	1	0	Cur		
23		22	1	0	Cur		
24		23	1	0	Cur		
25		24	1	0	Cur		
26		25	-1	0	Vot		
27		26	1	0	Vot		
28	#end Lpnode						

对应Lpnode.txt，Node number表示电路中自由度编号，Id0表示该自由度的规格数（当规格数为1时表示该自由的是待求解的，当为-1时表示该自由度是给定的，给定的值就是后面disp0的值），disp0表示约束自由度的给定值，而对于待求的自由度该值为0，Type表示该自由的类型。比如对于正弦电压供电的情况，节点25是接地节点，它的电压固定为0。

(a) #Lpnode

28	#end Lpnode							
29	#strand	physical region	V1	V2	I12	direction	Belong Winding	
30		AN1		1	2	13	-1 windA	strand.txt中的内容是由#strand和#winding_strand中的内容共同决定的。Physical region表示物理域名称，V1，V2和I12根据电路图对应于#Lpnode中相应自由度编号，direct表示电流在有限元区域中的方向（1表示流出纸面，-1表示流入纸面），最后一个参数表示这个这个strand所属绕组。
31		AP1		2	3	14	1 windA	
32		AP2		3	4	15	1 windA	
33		AP3		4	25	16	1 windA	
34		BP1		5	6	17	1 windB	给出了绕线式绕组的说明情况，各个参数依次表示绕组总匝数，绕组相电阻，并联支路数和每个绕组的初始电流。初始电流的这个设置在其它商软里可能没有，但是为了方便电压源供电的场路耦合，需要输入初始电流。电机的绕组本质上是一个电感，对于电感的瞬态仿真需要初始电流。第一步的有限元计算都是以初始电流为激励进行计算的。如果是仿真电流源供电的情况，这里的初始电流一定要和第一步电流源输入的电流一致。
35		BP2		6	7	18	1 windB	
36		BP3		7	8	19	1 windB	
37		BP4		8	25	20	1 windB	
38		CN1		9	10	21	-1 windC	#solid的内容和#winding_solid的内同决定了solid.txt中的内容。其中如果不需要计算这个solid构成绕组的磁链在Belong winding下可以不填，这时在#winding_solid中也不需要填写任何内容。
39		CN2		10	11	22	-1 windC	
40		CN3		11	12	23	-1 windC	
41		CN4		12	25	24	-1 windC	
42	#end strand							
43	#winding_stranded	Winding name	Total tu	Phase re	Parallel	Initial current		
44		windA	348	0.44	2	-4.758330249		#winding_stranded和#winding_solid中的内容分别决定wind_stranded.txt和wind_solid.txt的内容。在发卡绕组电机中粗导体也是可以并联的。
45		windB	348	0.44	2	-13		
46		windC	348	0.44	2	17.75833025		
47	#end winding_stranded							
48	#solid	physical region	V1	V2	direction	Belong Winding		
49		PM		25	26	1 windPM		
50	#end solid							
51	#winding_solid	Winding name	Initial	Parallel	number			
52		windPM	0	1				
53	#end winding_solid							

(b) #strand, #winding\_stranded, #solid, #winding\_solid 内容



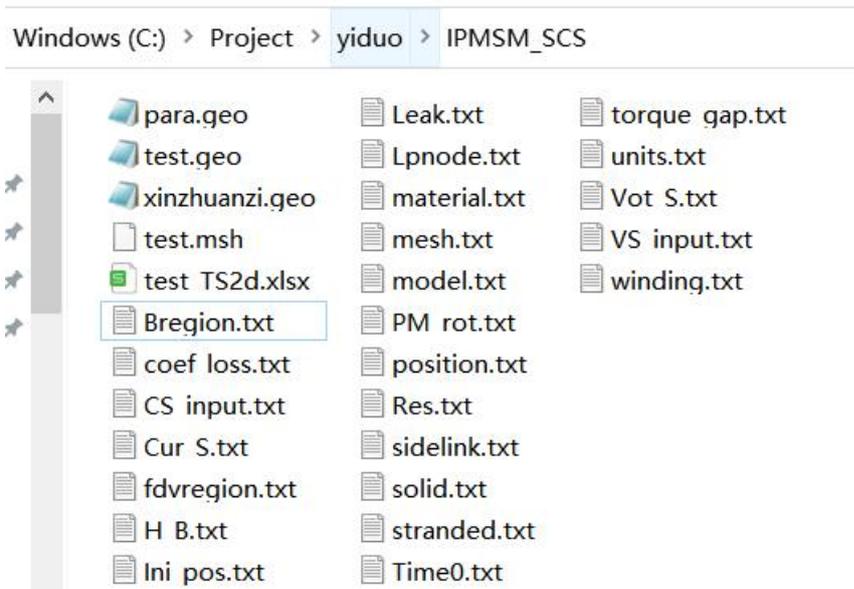


图 3-25 执行 Excel 转 txt 命令之后在 workpath 中新生成的文件

但是我们仍然将第一版中，查看这些 txt 的按钮保留，如图 3-26 所示。按钮的排布格式有了一些改变，另外新增了几个 txt 文件。txt 文件的详细说明，被放在了教程最后。需要说明的是，真正与程序进行交互的是这些 txt 文件，excel 只是相当于便于用户操作加了一层输入层，如果想要更加深入的使用这个软件，用户需要熟悉这些 txt 文件的内容，程序最后运行读取的是最终 workpath 里的 txt 文件。

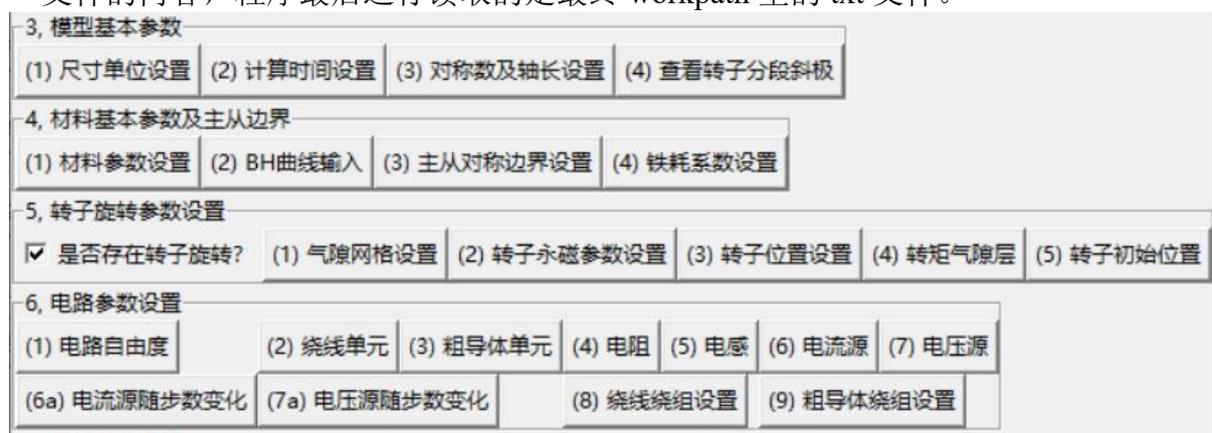


图 3-26 查看/修改各个 txt 文件的按钮

### 3.5. 步骤 5: 程序的运行

#### 3.5.1. 初始化

对于初学者，图 3-26 中步骤 3-7 中的按钮无需操作，当 txt 文件生成之后，切换到“**B 电磁计算**”界面即可。点击“(1)初始化”按钮，在控制台上会看到节点数，三角单元数等，如图 3-27 所示。mside 和 mlink 表示在 side 和 link 边上的节点数，相等节点数且都是 66，一般情况下可说明旋转对称边界被正确施加在了模型上。为了保险起见，建议用 gmsh 中的 Transfinite Line 命令将对应边上的点控制的相同。

点击“(1)初始化”按钮，对应的底层命令如图 3-28 所示。第一步将 geo 文件转换为.msh 文件实际上和点击“生成网格”按钮是重复的。Mesh2txt 和 convertId0 是将.msh 文件转化为 coord\_py, id0\_py, elem0\_py, disp0\_py 和 band\_py 文件，如图 3-29 所示。最后运行 con\_py\_f.exe 将\_py 文件进一步转化成 Fortran 生成的 exe 计算文件所

需读取的其他无后缀文件。这些文件作为中间文件与 exe 程序进行交互，他们的详细介绍被放在了第五章 6 瞬态场计算中间过程无后缀文件说明中。

```

Info : [100%] Meshing surface 272 (transfinite)
Info : [100%] Meshing surface 273 (Plane, Frontal-Delaunay)
Info : [100%] Meshing surface 274 (Plane, Frontal-Delaunay)
Info : Done meshing 2D (Wall 0.314146s, CPU 0.09375s)
Info : 4860 nodes 11334 elements
Info : Writing 'test.msh'...
Info : Done writing 'test.msh'
Info : Stopped on Thu Mar 17 16:17:56 2022 (From start: Wall 1.01775s, CPU 0.28125s)
Total node number is 4837
nodes read finished!
elements read success!
三角单元总数为: 9102
四边形单元总数为: 180
旋转边界节点数为: 180
4837
mside,mlink=      66      66
      66
0.0000000000000000E+000      60.000000000000000      -1
triangle=      9102
quadrangle=      180
    
```

图 3-27 初始化时控制台输出

```

def main(self):
    os.chdir(self.path.work) #切换到当前工作目录
    os.system(self.path_exe+'\\'+gmshtest'+self.geo_file+' -2 -format msh22') #重新生成gmshtest.2网格

    mesh2txt(self.msh_file,'coor0.py')
    convertid0(self.msh_file,"id0.py", "disp0.py", "elem0.py")
    #生成elemint, idint, coorint和dispint
    os.system(self.path_exe+'\\con_py_f.exe disp0.py idint units.txt coor0.py coorint sidelink.txt id1 material.txt elem0.py Area elemint')
    
```

图 3-28 点击“(1)初始化”时底层命令



图 3-29 点击初始化后 workpath 中新增的无后缀文件

### 3.5.2. 进行有限元计算

当初始化没有任何错误时，可以继续点击“开始计算”进行核心计算。如果程序没有错误，对于本案例，计算将在 54s 后完成 (Thinkpad P1),这个问题的计算节点数 4837，计算步数 120。计算完成后在 workpath 中会多出一些文件，主要的结果文件如图 7-1 所示，具体说明我们放在了第 7 章中。

### 3.5.3. 后处理查看结果文件

#### 3.5.3.1. 磁力线磁密查看

当计算完毕之后，拖动进度条选择需要查看磁力线和磁密的位置，点击“(3) 结

果显示”可以看到磁力线和磁密分布如图 3-31 所示。要得到图 3-31 中的两个图还需要对 gmsh 进行一些操作，这个通过截图介绍比较繁琐，会放到视频教程中。



图 3-30 选择需要计算磁密和磁力线的步数

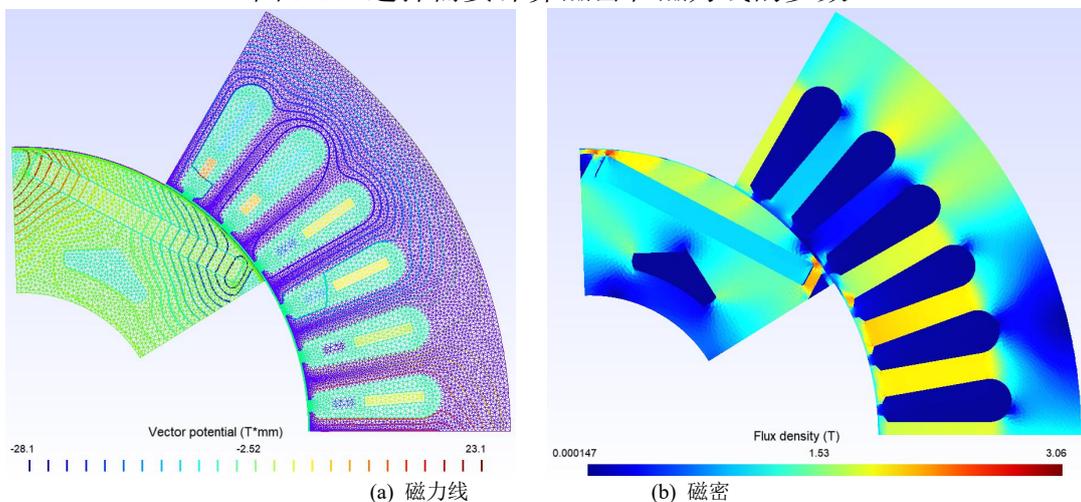
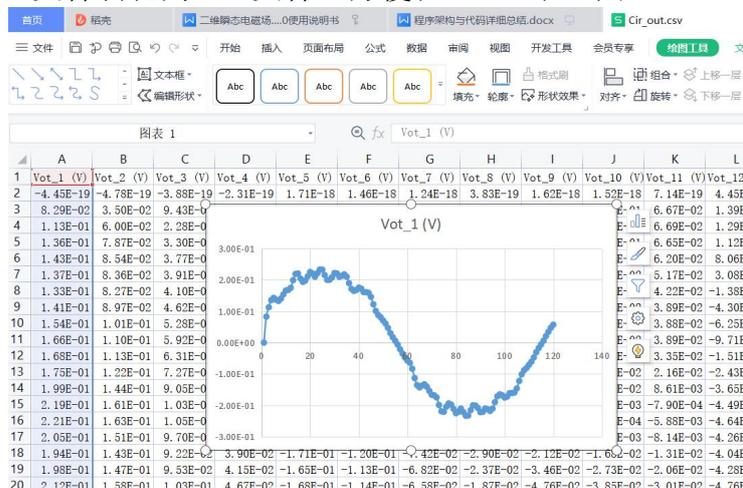


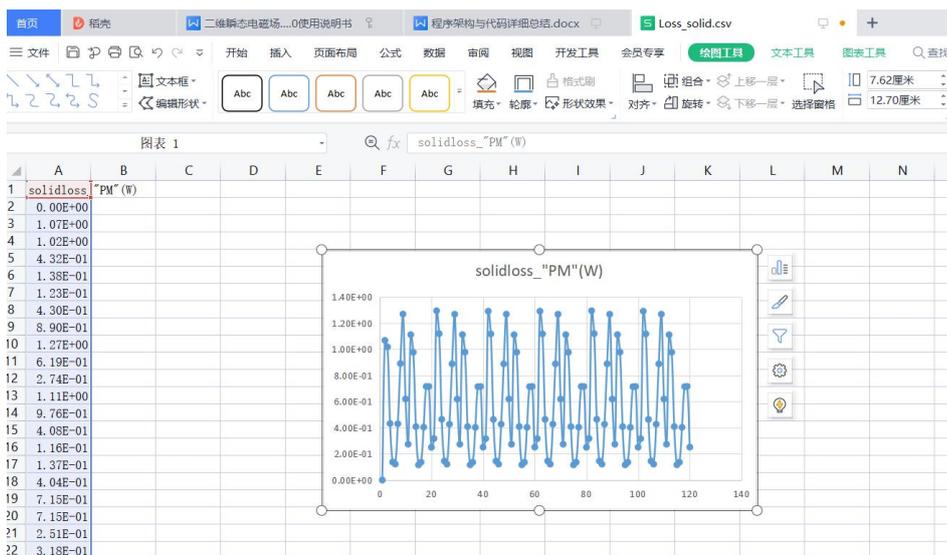
图 3-31 第 33 步磁力线和磁密分布

### 3.5.3.2. 转矩、损耗、磁链等查看

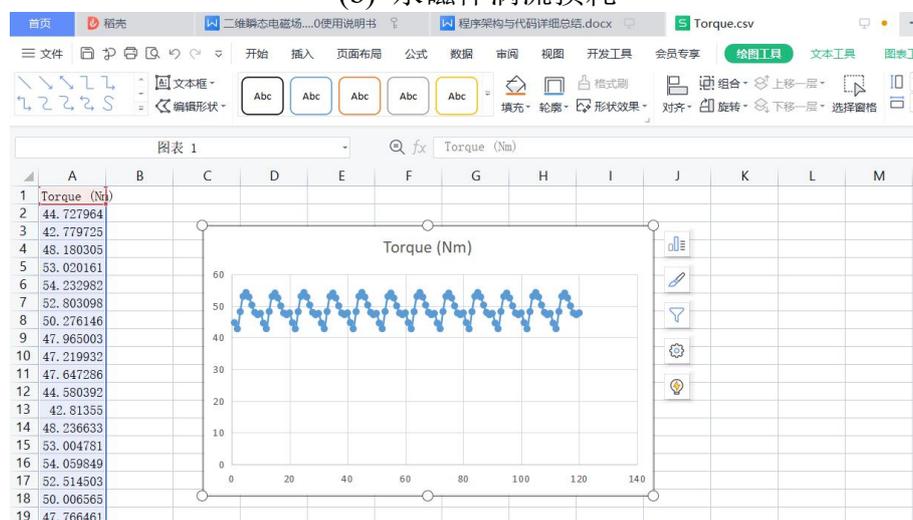
查看完磁密、磁力线之后，需要将 gmsh 关闭，才能进行其它操作。因为整个程序是单线程的，否则容易死机。依次点击后处理的 5 个按钮，可以分别输出电压电流、永磁体涡流损耗、转矩、磁链、硅钢片涡流损耗、和硅钢片磁滞损耗。这些文件实际就是将前面的 dat 文件转化为 csv 文件，方便在 excel 中画图。



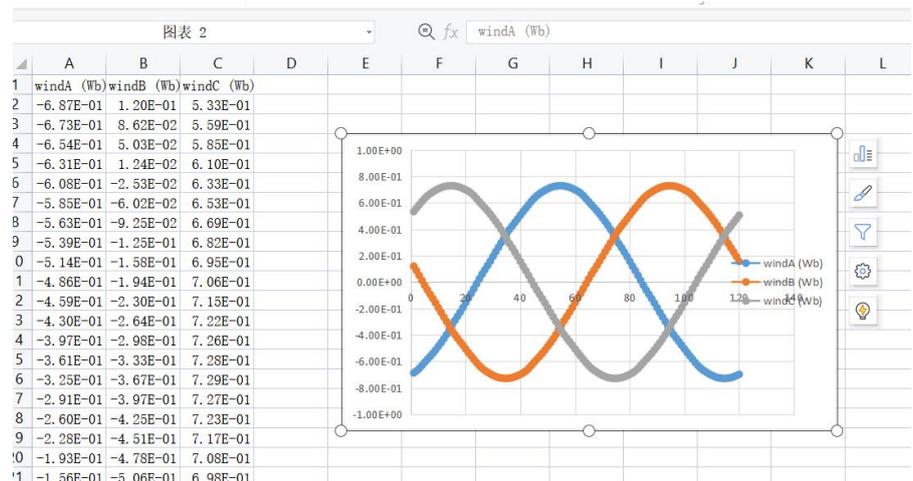
(a) 电压电流



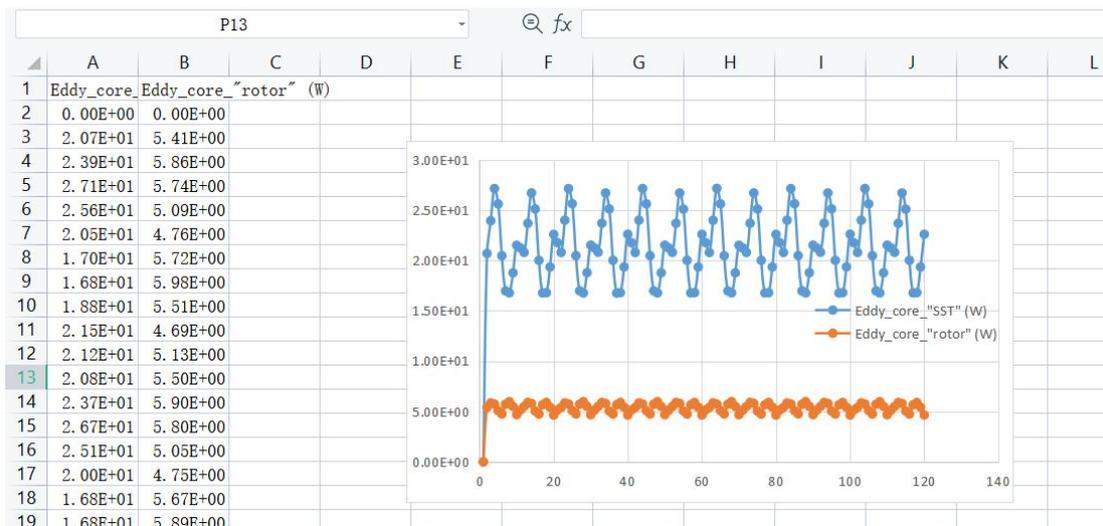
(b) 永磁体涡流损耗



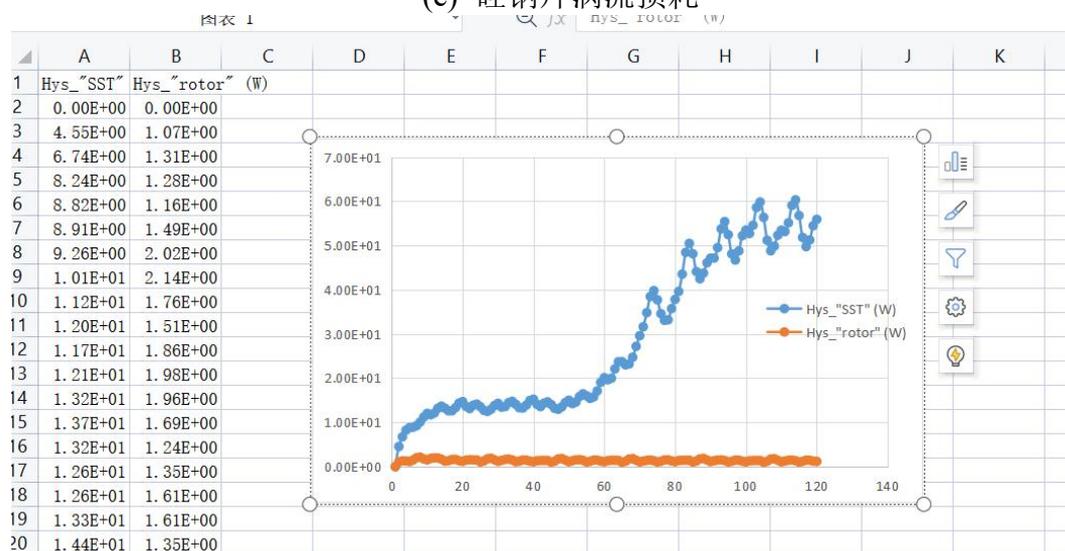
(c) 转矩



(d) 磁链



(e) 硅钢片涡流损耗



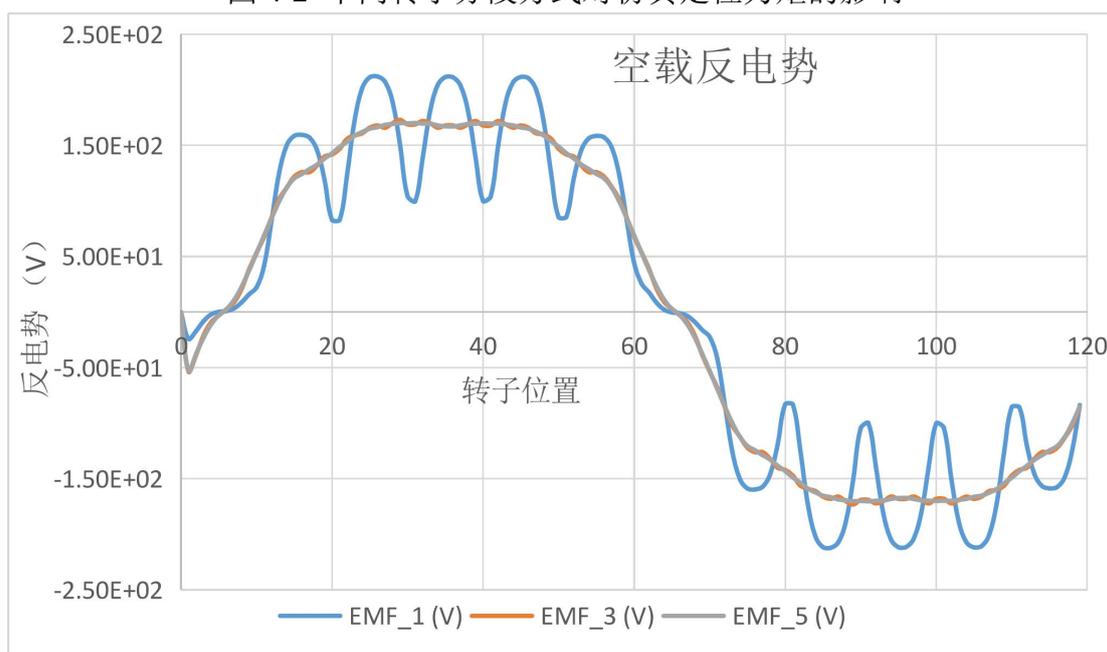
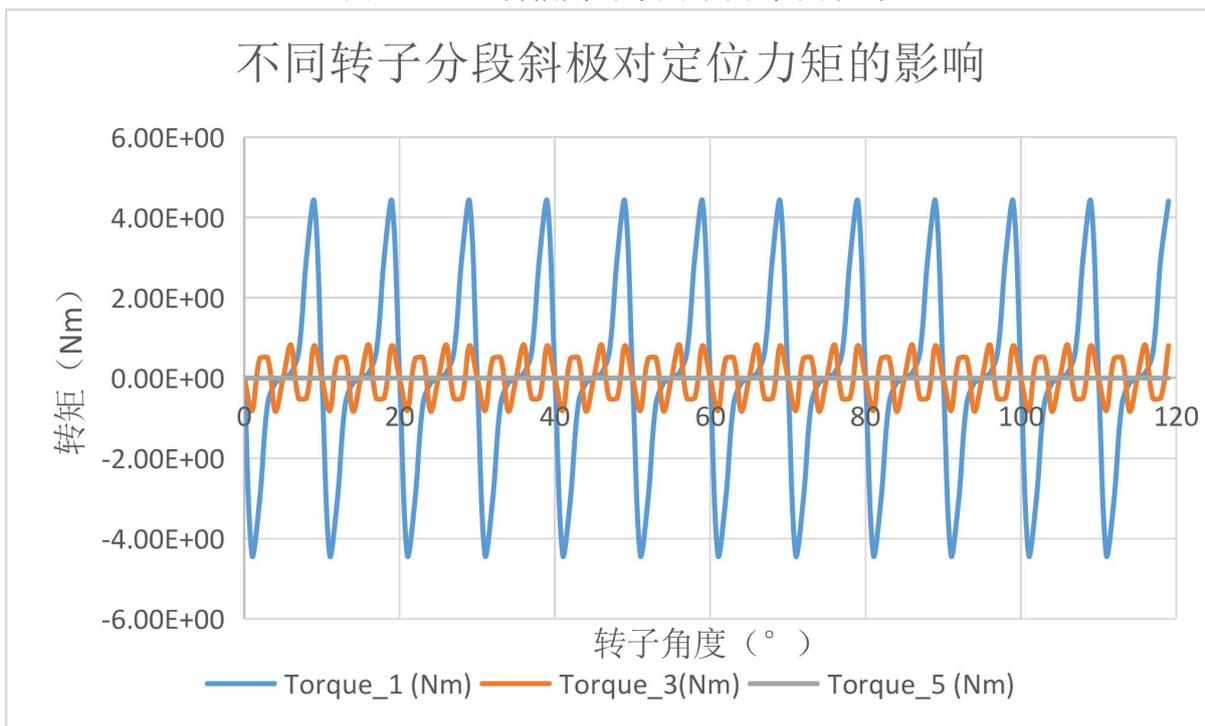
(f) 硅钢片磁滞损耗

图 3-32 CSV 文件中的各种结果

## 4. 案例教程

### 4.1. 案例一：斜槽对反电势、力矩的影响

首先展示 3.0 版本的斜极/斜槽模拟功能，在本软件中，无论是定子斜槽还是转子分段斜极都是通过转子分段斜极的方式来实现的。由于定子斜槽角为  $10^\circ$ ，采用不同转子分段斜极等效时的分段斜极设计如图 4-1 所示。当进行空载仿真时，将电流源置 0 即可。不斜槽、分三段、分五段空载仿真放在了 IPM\_noload\_skew1，IPM\_noload\_skew3，IPM\_noload\_skew5 中；不斜槽、分三段、分五段、分十段负载仿真放在了 IPM\_load\_skew1，IPM\_load\_skew3，IPM\_load\_skew5，IPM\_load\_skew10 中。这些仿真与第 3 章的几何和材料参数模型完全一致，只需要按图 4-1 所示修改分段斜极和电流源信息即可，读者参照这些现有的例程很容易明白。图 4-2 到图 4-5 中给出了空载和负载情况下不同转子分段时的仿真转矩、相电压情况，可以看出分 5 段和分 10 段的情况已经差不多，用转子分 5 段已经可以足够近似模拟定子斜槽  $10^\circ$  的工况。



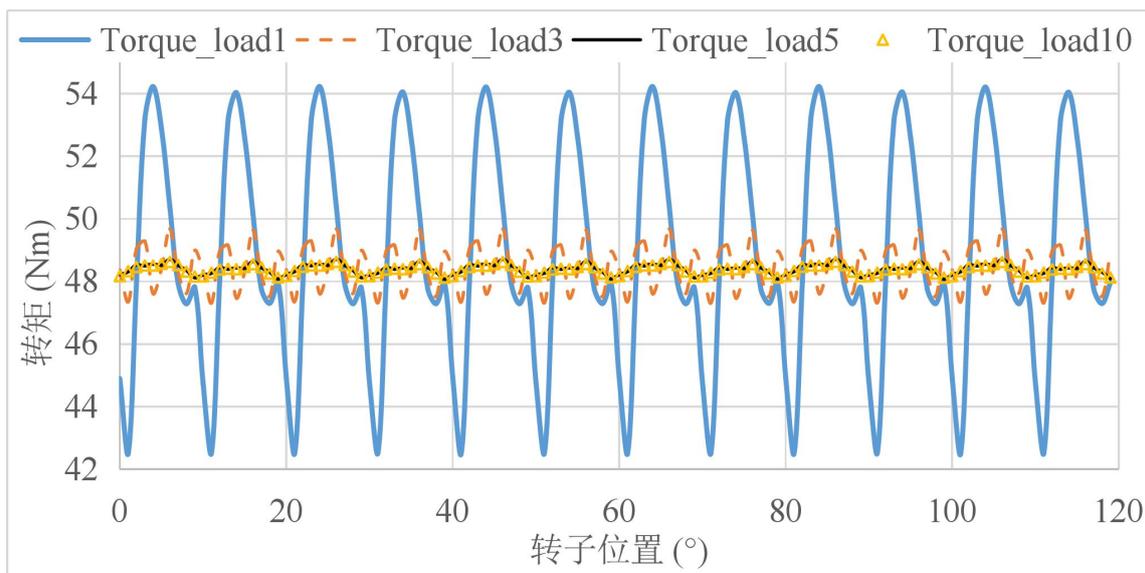


图 4-4 不同转子分段方式对负载转矩的影响

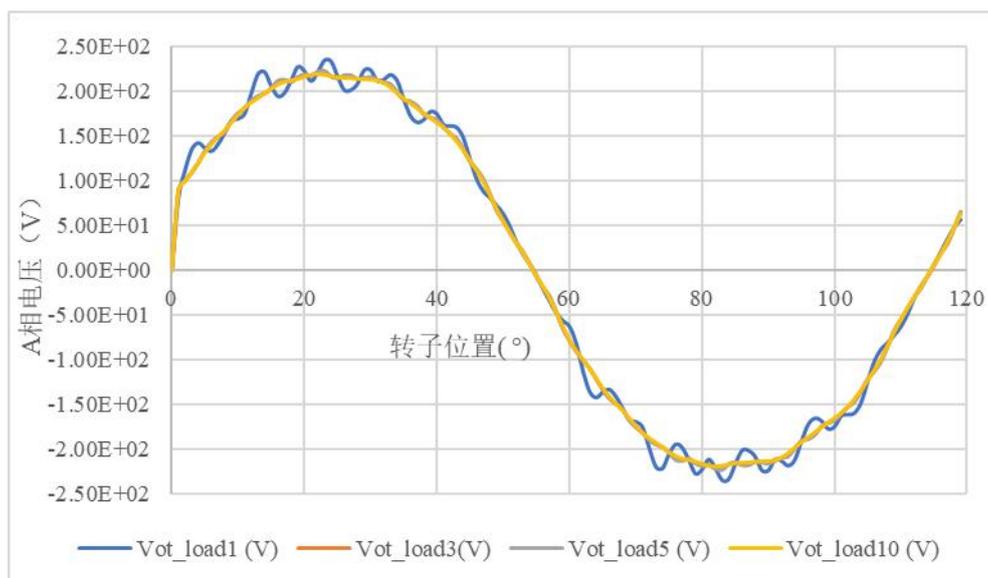


图 4-5 不同转子分段方式对相电压的影响

#### 4.1.1. 分段斜极与不分段斜极时的输入 TXT 文件对比

以 IPM\_load\_skew1, IPM\_load\_skew3 对比为例进行说明。从 test\_TS2d.xlsx 中的对比来看，两者的差别仅体现了图 4-1 中 #skew 的区别。但是其实，背后的真正用于 exe 程序输入的 txt 文件还是存在不少区别的。

##### (1) Skew.txt

Skew.txt 分三段斜极的设置如图 4-6 所示，这和图 4-1 是对应的。

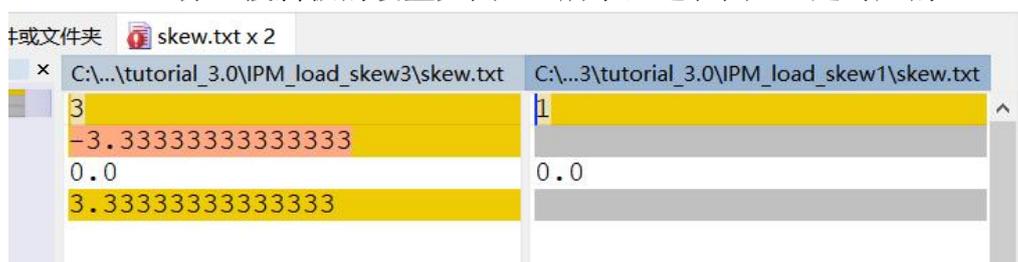


图 4-6 skew.txt 对比

(2) Model.txt

转子分三段斜极，每段的长度由 90mm 变成了 30mm。

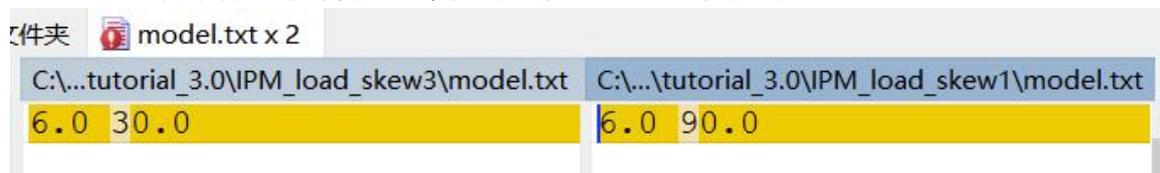


图 4-7 Model.txt 对比

(3) coef\_loss.txt

从表 1 中可以看出，physical region 一共有 19 个，且需要计算铁耗的材料编号分别为 15,16。在进行多层转子仿真时，第一层物理域编号为 1~19，第二层编号为 20~38，依次类推，因此对于三层转子需要计算铁耗的材料编号如图 4-8 左侧的所示。

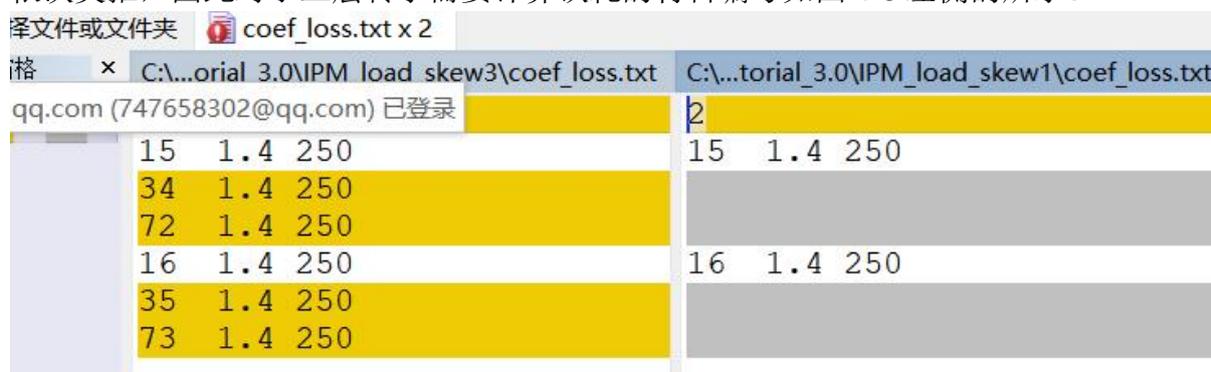


图 4-8 Coef\_loss.txt 对比

(4) torque\_gap.txt

图 4-9 中给出了计算转矩所需的材料编号，可上面类似，一层时计算转矩所用气隙层编号为 17 和 18，考虑三层，在对应的编号上加上 19 和 38 即可。

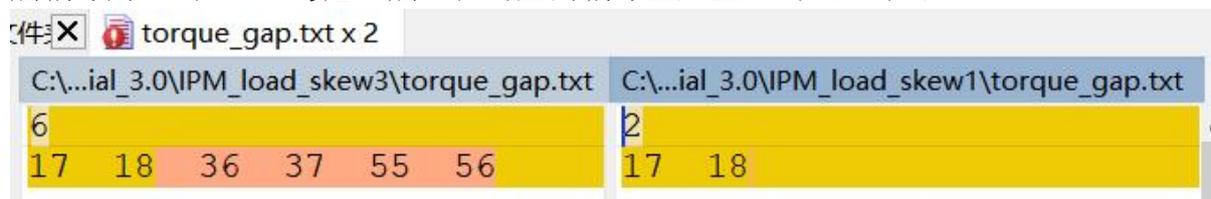


图 4-9 torque\_gap.txt 对比

(5) wind\_stranded.txt

细导线绕组也是类似的，原来的 windA 只包含编号为 5、10、11、13 的 AN1, AP1, AP2, AP3（详见表 1），再分成三层后，新增层上的物理域编号分别增加 19 和 38。

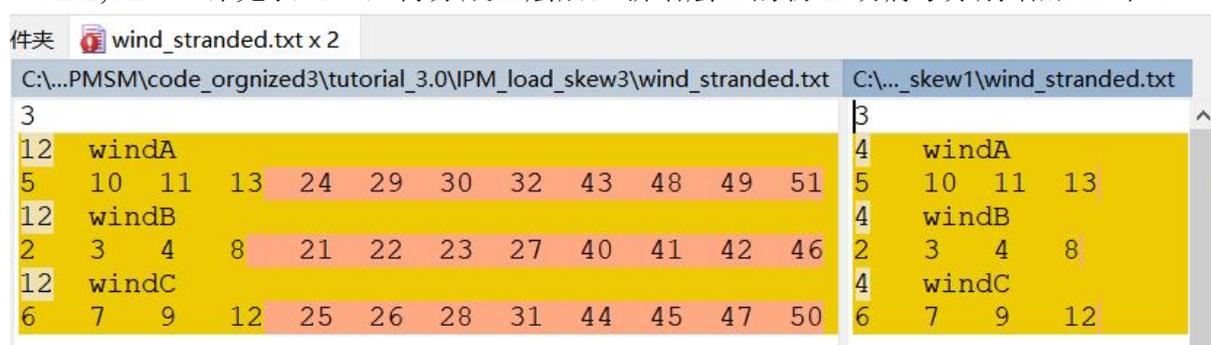


图 4-10 wind\_stranded.txt 对比

(6) wind\_solid.txt

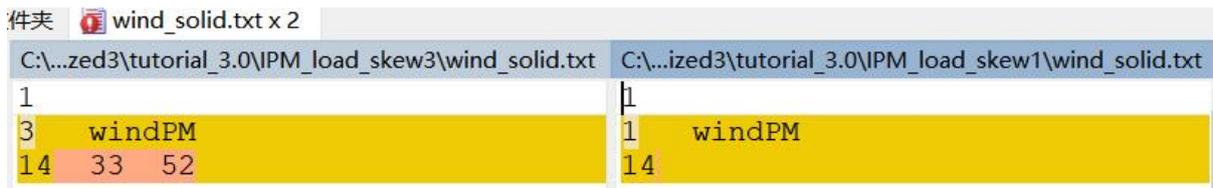


图 4-11 wind\_solid.txt 对比

(7) Stranded.txt

图 4-12 中给出了转子斜极斜槽电路拓扑的变化, 仅以 AN1 区域为例进行说明。AN1 变成了 AN1\_S1, AN1\_S2 和 AN1\_S3, 增加了这些区域之后需要对应的增加一些电路自由度。而这三个区域必然时串联的, 从电路的最大自由度编号 V26 开始, 从 27 开始编号, 按照一定的规则, 新增的自由度由于连接新增的区域, 不同物理域之间的接口不变。这样可以保持原有的电路拓扑和自由度不变。此外, 原来的每个物理域的电参数被平均分配到了各个 Section 中, 如图 4-12 所示。

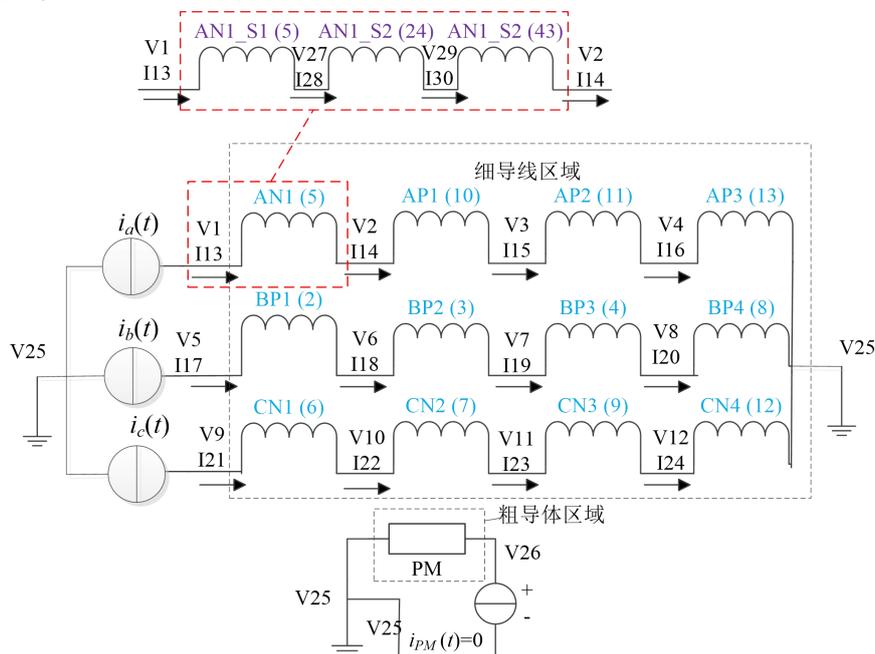


图 4-12 分段斜极时电路拓扑变化

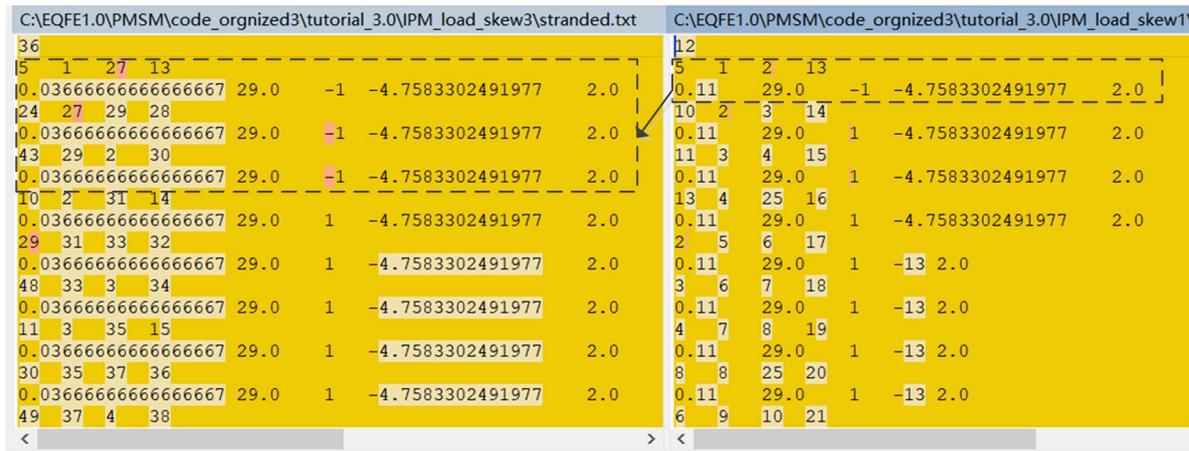


图 4-13 stranded.txt

(8) Solid.txt

Solid 区域的变化规律和 stranded 区域类似, 在此不再赘述, 如图 4-14 所示。

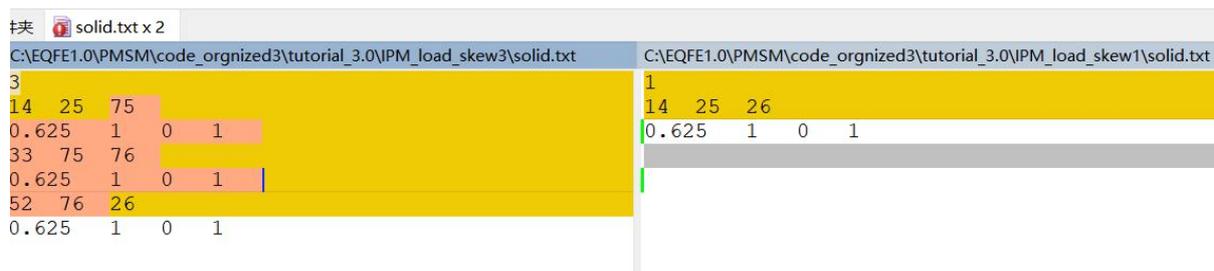


图 4-14 Solid.txt

(9) Lpnode.txt

由于分段斜极，电路的自由度增加如图 4-15 所示，这个是程序中自动计算出来的。

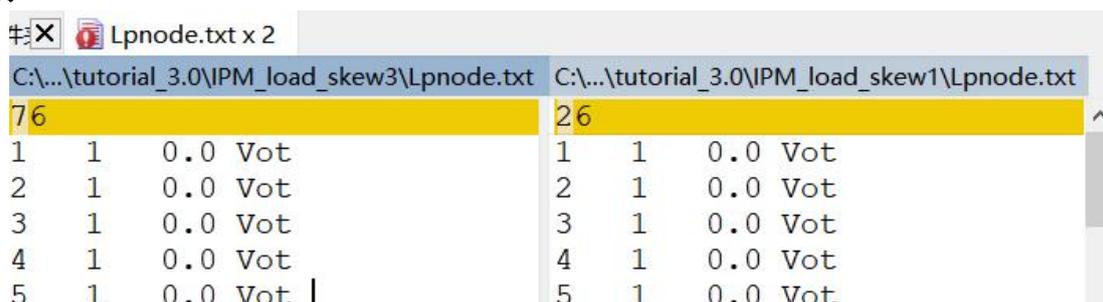


图 4-15 Lpnode.txt 对比

对于这些区别用户不用过于关心，只需要在 test\_TS2d.xlsx 设置好#skew 的内容即可。

## 4.2. 案例二：PWM 电源型逆变器供电仿真

本软件的一大优势在于计算 PWM 逆变器供电下的电压特性，由于可以通过第一步计算初始电流供电下的特性，避免了使用电压源供电计算引起的瞬态过渡过程，生成 PWM 的电压的原理参考 Yamazaki 的论文[7]。详细的计算流程如图 4-16 所示。这种方法的原理在于，首先通过三相正弦电流源供电下的工况计算出电机三相电压，然后计算三相电压基波分量，然后利用三相电压基波分量生成 PWM 电压，最后 PWM 电压为激励源进行电压源供电下的有限元计算，下面详述使用本软件实现上述计算流程的过程。

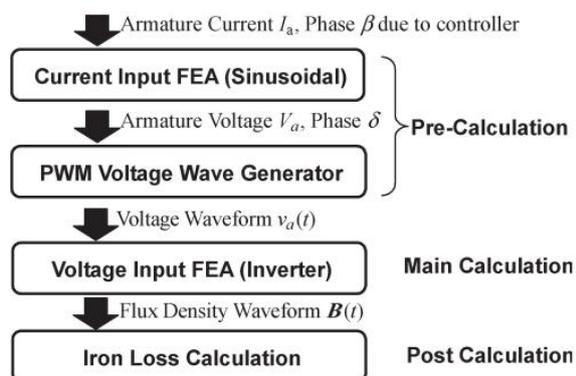


Fig. 1. Outline of calculation procedure.

图 4-16 Yamazaki 计算变频器供电下损耗流程

我们仍以第 3 章中的斜槽永磁电机为例进行讲解，根据之前不同转子分段数计算对比，选用转子分段数为 5 的情况模拟转子斜槽。

#### 4.2.1. 空载瞬态场仿真确定 $d$ 轴超前 $A$ 轴的夹角

这个例子保存在了...\tutorial\_3.0\IPM\_load\_skew5 中。

为了施加正确的电流、电压相位角，需要首先确定初始时刻  $d$  轴与  $A$  轴的夹角，也就是转子初始位置角  $\theta_i$ （电角度），如图 4-17 所示。图中  $\theta_r$  表示转子的机械角度， $p$  为极对数， $\theta_e$  为  $d$  轴超前与  $A$  轴的电角度。理论上讲， $\theta_i$  是可以直接通过绕组排布、永磁体充磁方向得到，这相对困难一些，后面会简要介绍，下面先通过空载磁链仿真确定  $d$  轴与  $A$  轴夹角。在空载情况下  $q$  轴磁链为 0， $A$ 、 $B$ 、 $C$  三相磁链可以通过  $dq$  反变换计算得到具体为：

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中， $f_A$ ， $f_B$ ，和  $f_C$  表示  $ABC$  坐标系下物理量，而  $f_d$ 、 $f_q$  和  $f_0$  表示  $dq$  坐标系下物理量。对于磁链基波，其零序分量也为 0，所以在空载情况下， $A$ 、 $B$ 、 $C$  三相绕组磁链为：

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_d \cos(p\theta_r + \theta_i) \\ \Psi_d \cos\left(p\theta_r + \theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Psi_d \cos\left(p\theta_r + \theta_i + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

其中， $\Psi_d$  表示  $d$  轴磁链，当只考虑基波分量时它是一个常数。由此可得只要计算出  $A$  相空载磁链的相位即可得到  $\theta_i$ 。从图 4-18 中可以看出， $A$  相绕组空载磁链在  $p\theta_r=15^\circ$  时达到负的最大值，而在  $p\theta_r=195^\circ$  处达到正的最大值，所以显然  $\theta_i=165^\circ$ 。如果担心直接观察法不精确，也可以通过傅里叶变换求得  $A$  相磁链基波分量的相位也可以得到  $\theta_i$ 。

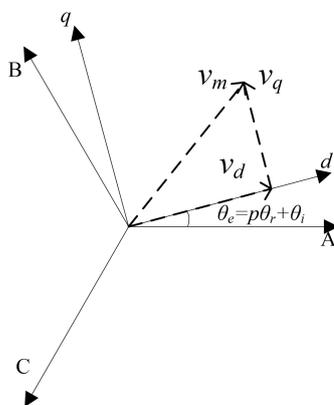


图 4-17  $dq$  坐标系说明

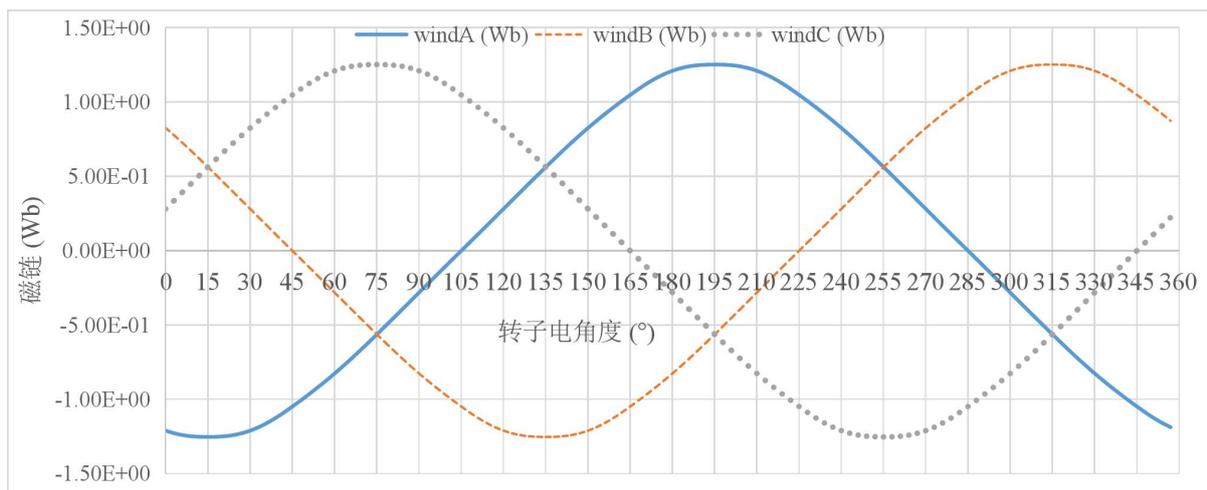


图 4-18 三相空载磁链

另外前面指出根据电机中绕组的排布和充磁方向也可得到 $\theta_i$ 的值。首先根据 material 中的设置，永磁体充磁方向与  $x$  轴夹角为  $30^\circ$ ，可以得到  $d$  轴与  $x$  轴的夹角如图 4-19 所示。对于 A 相绕组，由于有限元模型中只有 AP1, AP2, AP3 和 AN1, 不易判读 A 相轴线位置，将其他几个区域补齐后则很容易得到轴线的位置，很明显 A 相轴线的反方向与  $x$  轴夹角为  $35^\circ$ ，这就意味着  $d$  轴领先 A 轴  $175^\circ$  机械角度换算成电角度为  $165^\circ$  ( $175^\circ \times 3 - 360^\circ$ )。

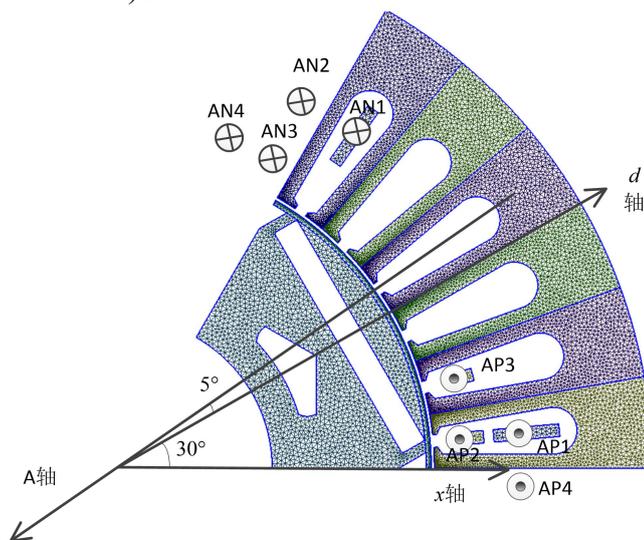


图 4-19  $d$  轴与 A 轴相对位置说明

#### 4.2.2. 三相正弦电流源供电仿真（快速插件）

尽管这个软件支持任意工况下的电流、电压输入，我们所分析的大部分情况都是三相对称正弦电流的工况。在这种情况下，通过第三章的方式输入电压、电流还是有一些不方便，比如改变电流幅值相位时不仅需要改变 CS\_input.txt 还需要改变 Stranded.txt 中的初始电流。改变一个周期点数时需要改变 Time0.txt 和 Position.txt。而且当需要生成一个周期 4000 个点时，拖拉 Excel 还是比较麻烦的。为此设计了两种自动生成三相电流输入的插件，一种是幅值相角式、另一种是  $dq$  电流式，相关内容分别放在了 SCS\_input.py, idq\_input.py 中，对应到 GUI 界面上是(8-1)和(8-2)两个按钮，如图 4-20 所示。当然读者还可以根据自己的需求编写一些自己的插件去适应自己电机的分析，比如对于多相电机读者可以自己书写插件。需要强调的是，有限元程序在运行过程中只是读取 txt 文件，excel 文件只是为了方便用户使用加的壳，只要保证 txt 文件是正确的即可。这两个按钮

建议是在 workpath 中已经正确生成了 stranded.txt, Cur\_S.txt 等一系列文件的前提下, 再运行这个两个插件按钮。

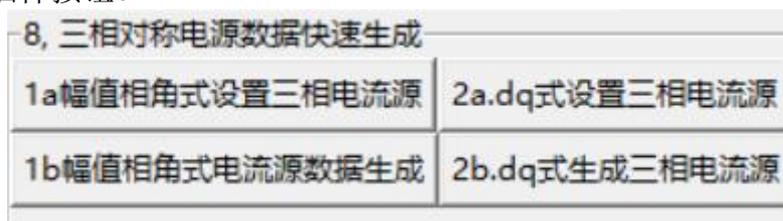


图 4-20 三相正弦电流快速输入插件

我们推荐直接采用 dq 式直接设置三相电流源信息, 但幅值相角式的功能仍然保留。

#### 4.2.2.1. 幅值相角式快速输入插件

这个例子放在了...tutorial\_3.0\IPM\_Im\_skew5 中。

具体的操作步骤为, 将 IPM\_noload\_skew5 文件夹复制, 重新命名为 IPM\_Im\_skew5, 打开 Simag3.0 软件, 将当前工作目录切换到新生成的文件夹。这时候的电路图和图 3-17 中一致, 这时候主要需要更改的就是 CS\_input.txt、Stranded.txt、Time0.txt 和 Position.txt 这几个 txt 文件。通过三相正弦电流快速插件的方法, 点击“(8.1-a)幅值相角式设置三相电流源”, 这时候如果 workpath 中没有 SCS\_input.csv 文件, 那么在工作目录中会新建一个这样的文件, 这时候只需要按照提示在里面填入相应的数据即可, 如图 4-21 所示。其中对应与“对应于 Cur\_S.txt 中编号次序”后面填写的数据对应于 CS\_input.txt 文件中的第二行。根据(4-2)和  $v = d\psi/dt$ , 三相相电压为:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_d p\omega \sin(p\theta_r + \theta_i - \pi) \\ \Psi_d p\omega \sin\left(p\theta_r + \theta_i - \frac{5\pi}{3}\right) \\ \Psi_d p\omega \sin\left(p\theta_r + \theta_i - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_d p\omega \sin(p\theta_r - 15^\circ) \\ \Psi_d p\omega \sin(p\theta_r - 135^\circ) \\ \Psi_d p\omega \sin(p\theta_r + 105^\circ) \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

当采用  $i_d=0$  控制方式时, 输入三相电流的相位和三相电压相位相同, 所以 A 相电流的相角同样是  $-15^\circ$ 。另一种确定定子坐标系下电流相角的方法是将给定的  $i_d$  和  $i_q$  值代入(4-1)亦可得到 ABC 坐标系下的电流相角。

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

此外, 由于仿真电机电流有效值为 13A, 电流的幅值为  $13\sqrt{2}$  A。

	A	B	C	D	E
speed (rpm):		1000			
一个周期内点数:		120			
总点数:		120			
电流幅值Im(A):		18.38477631			
A相电流相位phiA(°):		-15			
B相电流相位phiB(°):		-135			
C相电流相位phiC(°):		105			
对应于Cur_S.txt中编号次序:		1		2	3
电机极对数p:		3			
绕组类型(stranded or solid):	stranded				
说明:	Ia=Im*sin(p*theta+phiA)	Ib=Im*sin(p*theta+phiB)	Ic=Im*sin(p*theta+phiC)		

图 4-21 初始 SCS\_input.csv 中内容

设置好这些数据之后, 关闭这个 csv 文件, 点击“(8-1b)幅值相角式电流源数据生

成”这个按钮,会在 workpath 中自动更新 CS\_input.txt, stranded.txt, Time0.txt 和 position.txt 四个文件。这时候重新进行计算,就是按照更新后的 txt 文件为输入进行的计算了。点击“初始化”和“开始计算”即可重新开始计算。当单击“(8.1-a)幅值相角式设置三相电流源”时是相当于调用了 SCS\_gen 类中的 ini\_SCSin()函数;当单击“(8-1b)幅值相角式电流源数据生成”时,相当于依次调用了 SCS\_gen 类中的 readcsv(), Time0\_pos\_CSi\_update()和 para\_ts.strand\_update()函数。

#### 4.2.2.2. dq 电流式三相电流快速生成插件

这个例子放在了...\tutorial\_3.0\IPM\_idq\_skew5 中。

上述计算中需要确定 A、B、C 三相电流的相角,在  $i_d=0$  时,通过端电压和电流相位一致确定电流相角还较为容易,但是在弱磁控制时需要进行人工计算,还是比较麻烦的。为此,在这里设计了另一个三相电流生成的快速插件,可以跟据(4-4)直接利用输入的  $d$ 、 $q$  轴电流生成三相电流。在实际应用过程中,幅值相角式和  $dq$  电流式只要选用一个即可,推荐使用  $dq$  式,因为这样无需人工计算 ABC 三相电流相角。这个插件对应于 idq\_input.py 文件。在 GUI 操作时,点击图 4-20 中“2a.dq 式设置三相电流源”,会弹出如图 4-22 所示的 idq\_input.xlsx 文件。根据提示,在里面输入相应的数据即可。其中的关键参数  $\theta_i$ ,可通过 4.2.1 节中的空载瞬态场的仿真得到。最后点击“2a.dq 式生成三相电流源”即可生成三相电流数据和对应的 Position.txt、Time0.txt、CS\_input.txt 和 Stranded.txt。

	A	B	C	D	E	F
1 电机转速(r/min):		1000				
2 电机极对数p:		3				
3 一个电周期步数:		120				
4 总步数:		120				
5 d轴初始超前A轴电角度thetai(°):		165				
6 d轴电流:		0				
7 q轴电流:		18.38477631				
8 ABC三相电流源在Cur_S.txt中的编号		1	2	3		
9 绕组类型(solid or stranded):		stranded				
0 说明:		iA=id*cos(thetae)-iq*sin(thetae)				
1		iB=id*cos(thetae-2*pi/3)-iq*sin(thetae-2*pi/3)				
2		iC=id*cos(thetae-2*pi/3)-iq*sin(thetae-2*pi/3)				
3		thetae=p*thetam+thetai				
4		thetam是转子机械角				

图 4-22 dq 电流式设置三相电流源(idq\_input.xlsx)

运行仿真最后得到的计算结果和 4.2.2.1 节结果完全一致。

#### 4.2.3. 三相正弦电流供电下 dq 轴磁链、电压快速计算插件

这个例子放在了...\tutorial\_3.0\IPM\_idq\_skew5 中。此处不需要做重复有限元计算,只需要在后处理中进行即可。

在计算进行完三相正弦电流供电下的仿真后,在后面就可以进行纯正弦电压供电或者是 PWM 电压供电下的仿真时,都需要进行正弦电流下基波电压的计算,这需要通过正弦电流供电下得到的磁链进行计算,具体的计算公式为:

$$v_m = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, \quad \varphi_0 = \begin{cases} \arctan(v_q/v_d), & v_d \geq 0 \\ \arctan(v_q/v_d) + \pi, & v_d < 0 \end{cases} \quad (4-5)$$

$$v_d = R_s i_d - \omega_e \cdot \psi_q^{av}, \quad v_q = R_s i_q + \omega_e \cdot \psi_d^{av} \quad (4-6)$$

$$\psi_q^{av} = \frac{3}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \psi_q(\theta_e) \cdot d\theta_e, \quad \psi_d^{av} = \frac{3}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{3}} \psi_d(\theta_e) \cdot d\theta_e$$

在计算  $d$ 、 $q$  轴磁链时，需要用到  $dq$  轴变换，这里采用的坐标系如所示。

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_e & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

$$\theta_e = p \cdot \theta_r + \theta_i \quad (4-8)$$

其中  $\theta_i$  表示初始转子位于初始位置时， $d$  轴与 A 轴的夹角的电角度，这个很容易通过空载磁链的波形得到。 $\theta_r$  为转子机械角度， $p$  为电机极对数。

所以在正弦电流供电情况下计算出磁链之后，还需要设置  $\theta_i$  才能进行坐标变换得到  $dq$  轴磁链和电流，进一步的还需要相电阻，可以根据(4-6)和(4-7)计算  $d$ 、 $q$  轴电压。 $\theta_i$  在 4.2.1 节通过空载仿真得到，相电阻应等于 TS2D\_\*.xlsx 中设置的相电阻。对应到具体软件上的操作为，在计算完成之后，点击“(6a)设置  $d$  轴与 A 轴夹角”得到如图 4-23 所示的 dqinform.xlsx 文件。如果文件夹中已经存在这个文件，则会直接打开这个文件而不会新建一个。输入  $d$  轴与 A 轴的夹角，对于这个问题为  $165^\circ$ ，相电阻为  $0.44\Omega$ ，其他的参数虽然有些和 idq\_input.xlsx 中重复了，这里为了数据传递方便，还是在这里重复了一下。然后关闭 dqinform.xlsx，点击计算“(6b)计算  $dq$  轴电压和磁链”这时候就能够得到 4-23 所示的输出。在计算时显示的是平均磁链和平均电压，因此在这个计算时最好取完整一个周期。

	A	B	C	D	E
d轴与A轴初始夹角(°):		165	(输入, 由空载反电势确定)		
Phase resistance(Ω):		0.44	(输入)		
并联支路数:		2	(输入)		
电机转速(r/min):		1000	(输入)		
极对数:		3	(输入)		
A、B、C三相磁链在flux.dat中位置:		1	2	3	(输入)
d轴电流(A):		-1.2E-15			
q轴电流(A):		18.38478			
d轴磁链(Wb):		0.584632			
q轴磁链(Wb):		0.401751			
d轴电压(V):		-126.214			
q轴电压(V):		191.757			

图 4-23  $dq$  电压磁链计算 (dqinform.xlsx)

这部分对应的 python 程序在 fluxvot\_fun.py。点击“(6a)设置  $d$  轴与 A 轴夹角”相当于运行 voltflux\_cal 类中的 initial() 函数，而点击“(6b)计算  $dq$  轴电压和磁链”相当于运行依次运行 voltflux\_cal 类中的 readinform(), votflux.dqcal() 和 votflux.output() 函数。具体这些函数的功能详见代码本身的注释。

#### 4.2.4. 三相正弦基波电压（插件快速生成）供电下的计算

相关程序保存在了...\tutorial\_3.0\IPM\_SVS\_skew5 中。

如果只是计算 PWM 逆变器供电下的总损耗，是不需要进行正弦电压供电下的仿真。但是如果为了分离基波与高次 PWM 谐波损耗则这步的计算必不可少。可以认为 PWM 电压供电下计算的损耗减去正弦电压供电下的损耗就是 PWM 谐波电压引起的损耗。此外，三相正弦电压供电下的电路图与 PWM 电压供电下的电路图一致，如图 4-24 所示。

这时候电路的拓扑发生了变化，需要重新修改\*\_TS2d.xlsx 中 circuit 工作表中的内容。相关的文件保存在了...\tutorial\_3.0\IPM\_SVS\_skew5 中。

这时候输入不同的三相电压有两种方法，一种就是通过\*\_TS2d.xlsx 输入，这种方法可以输入任意的电压。另一种方法专门针对三相正弦电压激励的工况，在三相正弦电流工况下计算得到 dq 轴电压（保存在 dqinform.xlsx 中，并将其复制到当前文件夹）之后，通过 dq 轴电压直接生成三相电压。具体的计算模块保存在了 SVS\_votgen.py。注意采用第二种快捷插件的方法的前提是\*\_TS2d.xlsx 已经正确输入且已经生成正确的 Vot\_S.txt 等文件，即电路的拓扑已经被正确输入。这时候可以用第二种方法快速更改不同的电压输入。

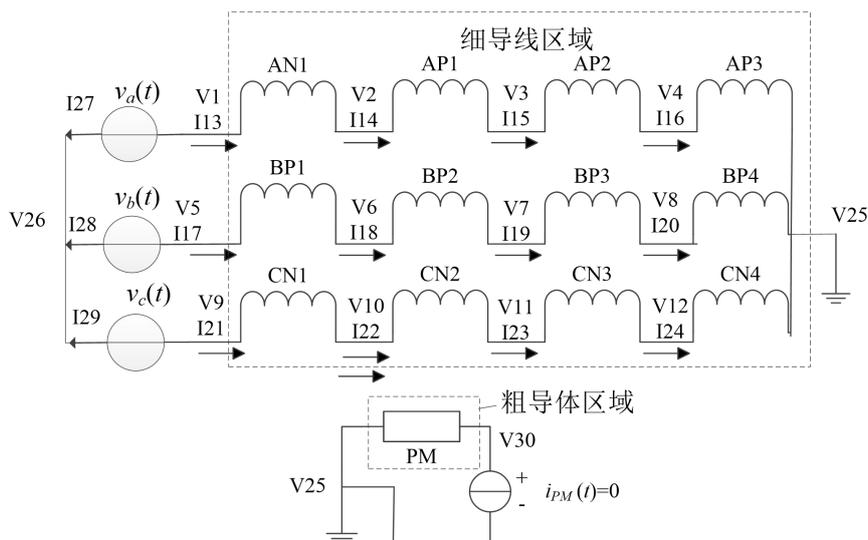


图 4-24 三相正弦电压供电电路图

对应到 GUI 上的操作，首先单击“8-3a 三相正弦电压参数输入”按钮，如果当前 workpath 中没有 SVS\_input.xlsx，则会新建一个，内容如图 4-25 所示。在图中按照提示填入相关数据（类似于 SCS\_input.csv）。不同的是，这里不需要给定电压的幅值和相位，而是以 dqinform.xlsx 中得到的 dq 轴电压为输入。这个 dqinform.xlsx 可以直接从 4.2.3 节中得到的结果复制过来。abc 三相电压的计算计算公式为：

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \cos \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

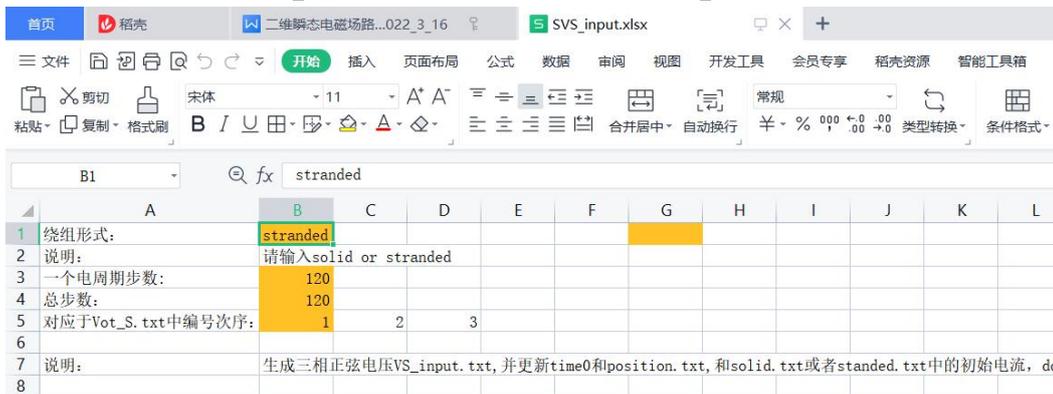


图 4-25 SVS\_input.xlsx 文件

上面通过平均磁链计算的 A 相电压相位对应于 A 相基波电压的精确值。但是在  $\theta$  实际有限元数值计算中是采用了差分代替微分运算，当运用简单后向欧拉法计算时，电压与磁链的关系为：

$$\begin{aligned} v_a^{num}(\theta_e) &= \frac{\psi_a(\theta_e) - \psi_a(\theta_e - \Delta\theta_e)}{\Delta\theta_e} \cdot \omega_e + R_s i_a(\theta_e) \\ &= \frac{d\psi_a}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta_e + \frac{\Delta\theta_e}{2}} + R_s i_a(\theta_e) + O(\Delta\theta_e^2) \approx v_{ex} \left( \theta_e - \frac{\Delta\theta_e}{2} \right) \end{aligned} \quad (4-10)$$

所以数值方法得到的电压为：

$$v_a^{num}(\theta_e) = V_m \cos \left( \omega_o t + \varphi_A - \frac{\Delta\theta_e}{2} \right) \quad (4-11)$$

注意这个电压是从 0 时刻开始的电压，其相位是  $\varphi_A - \frac{\Delta\theta_e}{2}$ 。在实际有限元计算第 1 步有限元计算施加的电压为 0，进行的是以初始电流为输入的有限元计算。所以实际电压都是从第 2 步开始施加的，这样从第 2 步开始施加的电压的相位为：

$$\varphi_A^{2-(N+1)} = \varphi_A + \frac{\Delta\theta_e}{2} \quad (4-12)$$

具体地，在进行电压源供电的有限元计算时，第 1 步是以初始电流输入的计算，第 2 步当转子位于  $\Delta\theta_e$  时，施加的是位于  $(\Delta\theta_e/2)$  处的精确电压；转子位于  $2\Delta\theta_e$  时，施加的是位于  $(3\Delta\theta_e/2)$  处的精确电压；转子位于  $3\Delta\theta_e$  时，施加的是位于  $(5\Delta\theta_e/2)$  处的精确电压；... 依次类推。

图 4-26 对比了正弦电流源供电和正弦电压源供电两种情况下计算转矩对比，可以看出两种非常接近，说明采用的相角修正方法的正确性。

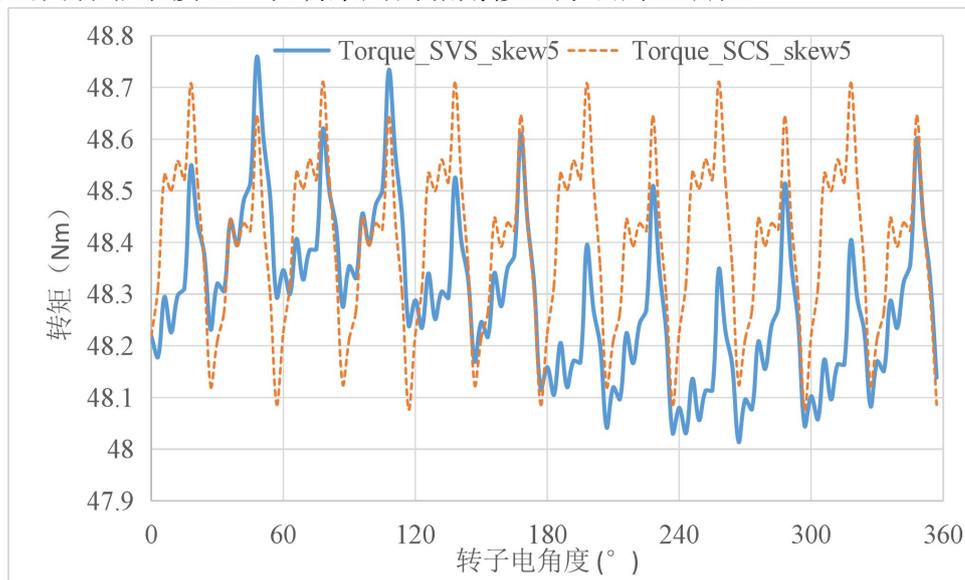


图 4-26 正弦电流源供电与正弦电压供电下计算转矩对比

#### 4.2.5. PWM 电压供电下的有限元计算

相关程序文件保存在了...tutorial\_3.0\IPM\_PWM\_skew5 中。

由于 PWM 电压供电的电路图拓扑和图 4-24 一致，因此直接将 IPM\_SVS\_skew5 文件夹复制，并重新命名成 IPM\_PWM\_skew5 即可。这时候只需要更新 Time0, position, VS\_input, stranded 等几个 txt 文件的内容即可。这也设计了专门的插件，如图 4-27 所示。这些插件对应的脚本放在了 PWM\_gen.py 中。

点击“4a. 设置 PWM 电压源参数”，此时会打开如图 4-28 所示的 PWM\_VSI\_inform.xlsx 文件只需要填入逆变器参数即可。此时关闭这个文件，会继续出现 dqinform.xlsx 这个文件，这个文件可从 4.2.3 得到的结果直接复制而来。这里打开的主要目的是**确认一下该文件存在**，且填写正确。关闭 dqinform.xlsx，点击“4b.PWM 电压源数据生成”。此时会自动更新更新 Time0, position, VS\_input, stranded 等几个 txt 文件。此时可以直接初始化，开始计算。此外这里还有一个“4c. PWM 电压频谱分析”按钮。点击这个按钮会生成线电压波形和一系列的电压频谱分析，包括线电压、定转子坐标系和静定 dq 坐标系，分别保存在了 Simag\_3PWMV.xlsx、Spectra\_aerfa\_beta.xlsx 和 Spectra\_dq.xlsx 中。

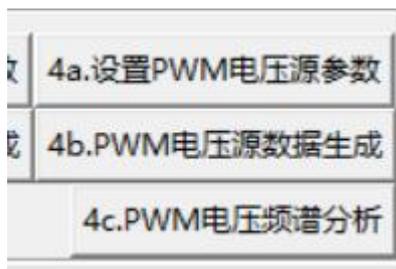


图 4-27 PWM 电压生成插件

图 4-29 中给出了 PWM 电压为输入计算的转矩波形，图 4-30 中给出了计算三相 PWM 谐波电流，图 4-31 是三相 PWM 电压，图 4-32 是一个分段的定子硅钢片涡流损耗。PWM 逆变器供电下每个分段的永磁涡流损耗和定、转子磁滞涡流损耗都可以通过和第 (a)3.5.3.2 介绍的方法查看，在此不再赘述。需要指出的这里铁耗模型是常系数的、和 ANSYS 中一样的铁耗模型，永磁铁损耗是二维损耗。

	A	B	C	D
1	直流母线电压 (V):	554		
2	开关频率 (Hz):	4000		
3	一个周期点数:	2000		
4	VS_input.txt 中输入电压对应于 Vot_S.txt 中编号:	1	2	3
5	绕组类型 (solid or stranded):	stranded		

图 4-28 PWM\_VSI\_inform.xlsx 中内容

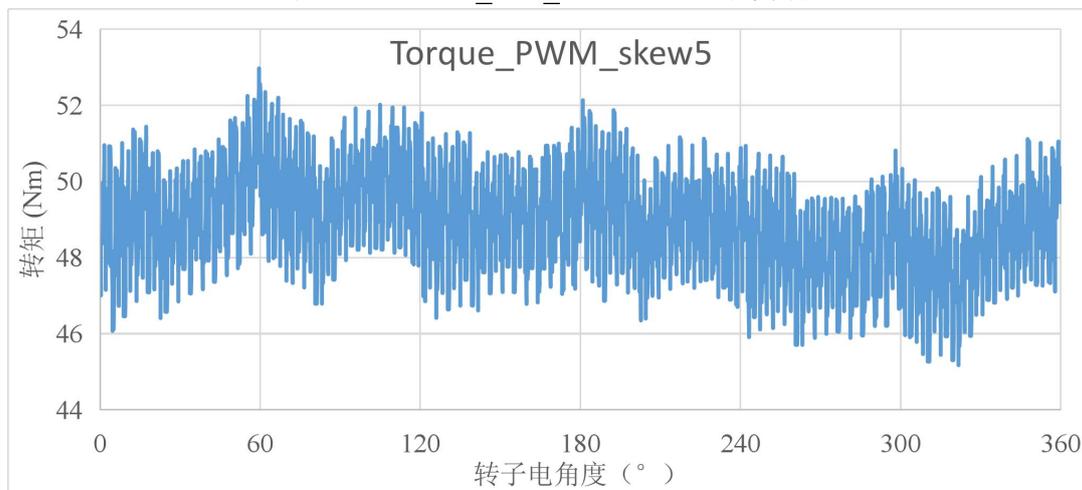


图 4-29 PWM 电压源供电下转矩波动

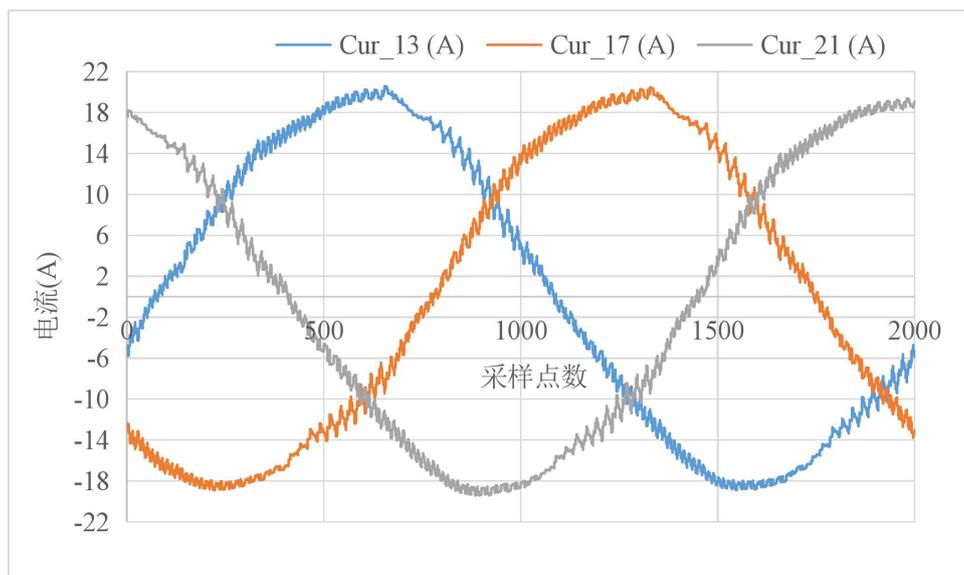


图 4-30 PWM 电压源供电下计算三相电流波形

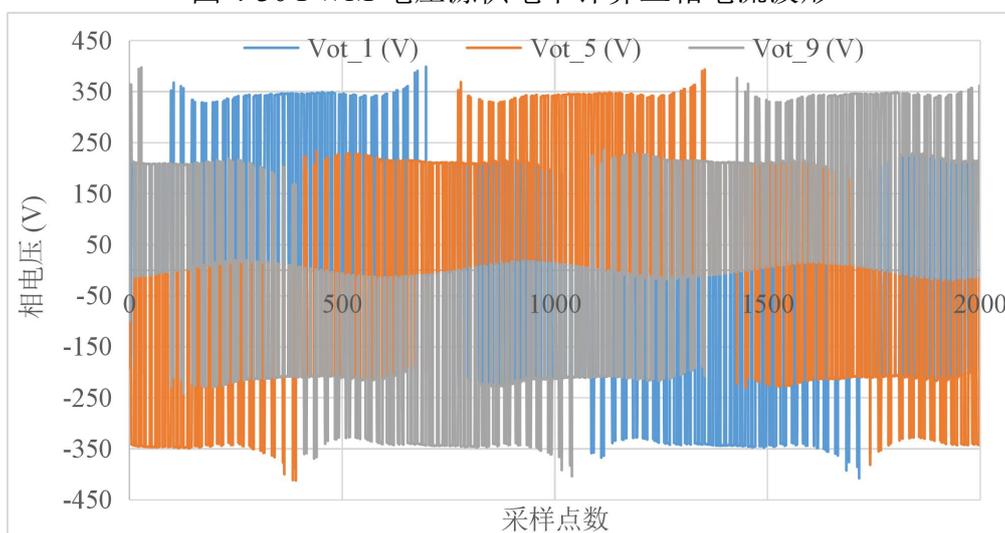


图 4-31 PWM 电压源供电下计算三相相电压波形

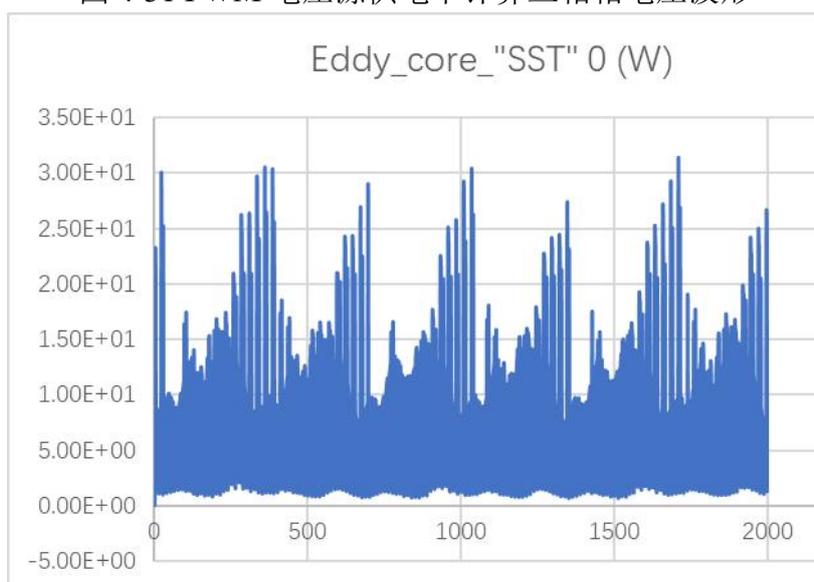


图 4-32 定子硅钢片涡流损耗 (第 1 段)

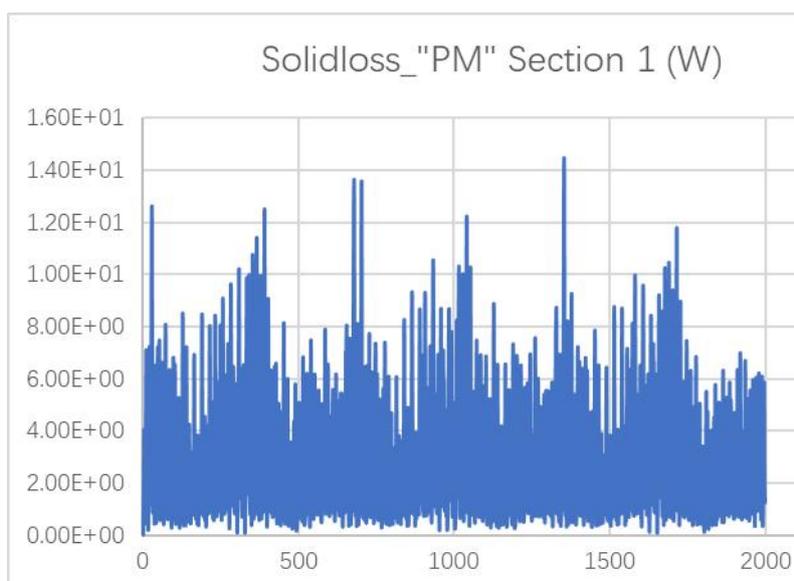


图 4-33 永磁体涡流损耗（第 1 段）

### 4.3. 案例三：细导线绕组 IPM 参数化扫描

本软件还可以实现自动损耗、磁链的自动扫描功能。仍以第三章详述的样机，转子分 5 段模拟斜槽的案例进行介绍，相关文件放在了...\tutorial\_3.0\IPM\_sweep\_skew5 中。

进行参数扫描的界面如图 4-34 所示。输出量包括了复选框中的内容，而变量则通过一个 CSV 文件输入。点击“(1)设置输入变量”，如果文件夹中没有参数文件，则会以文本框中的参数文件名在当前文件夹中新建一个 csv 文件，并打开。

 二维电磁场-路耦合仿真软件SiMAG3(版权所有:朱洒, qq:747658302)

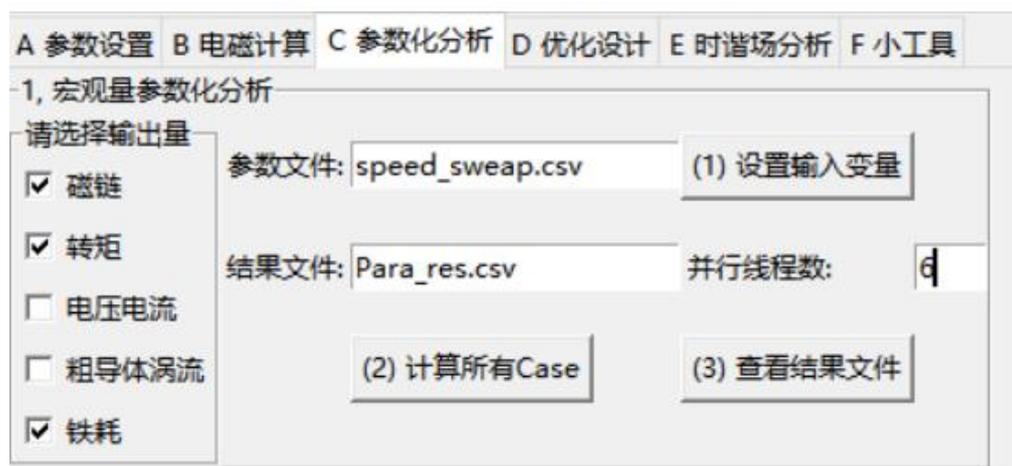


图 4-34 参数化扫描界面

然后需要按照一定的规则填写这个参数文件。图 4-35 中给出了两个例子，具体填写参数文件的规则如下。其中第一行表示类型，第二行表示具体变量。第一列表示每个 case 号。其中：

(1) **Var**: 表示变量，这部分只能是数值，可以将其用符号代替，可以在后面的变量中进行调用，如 id 和 iq。

(2) **EQ**: 表示方程，这部分可以是表达式，表达式中以 Var 中的变量为输入，采用 python 的语法书写。如  $I_m = \text{math.sqrt}(id*id+iq*iq)*(-1)$ ,  $aerfa = \text{math.asin}(id/I_m)$ 。

(3) CS: 用于对每个 Case 更新更新 CS\_input.txt 中的值。变量 1、2、3 对应于 CS\_input.txt 的三个电源。以电流源 1 为例:  $I_m \cdot \sin(\text{Pos} \cdot 4 \cdot \pi / 180 + \text{aerfa})$ , 它表示 a 相电流, 其中的 Pos 是系统保留关键字, 表示 Position.txt 中每步对应的角度。

(4) Strand: 对应用于参数化 Stranded.txt 中的内容, 1%4 表示用于修改第一个细导体单元的第四个参数, 也即是其初始电流。同样, 2%4 表示第二个细导体单元的第四个参数, 以此类推。如第一个细导体单元初始电流为:  $I_m \cdot \sin(\text{aerfa})$ 。注意电路的拓扑连接方式目前不支持参数化。

(5) Geo: 用于参数化几何模型中的参数, 即保存在 para.geo 中的参数。在 Geo 所在的列, 变量名为变量在 para.geo 中的名字, 变量的值可以是具体数字也可以是 Var 和 EQ 中变量所组成的表达式。

(6) Mat: 用于参数化 material.txt 中的内容。其变量名和 stranded 中类似为 a%b 的结构, 对应于 a 行 b 列的变量。

(7) PMrot: 用于参数 PM\_rot.txt 中的内容。其变量名和 stranded 中类似为 a%b 的结构, 对应于 a 行 b 列的变量。

(8) Res: 用于参数化 Res.txt 中的内容。其变量名和 stranded 中类似为 a%b 的结构, 对应于 a 行 b 列的变量。

(9) Solid: 用于参数化 Solid.txt 中的内容。其变量名类似于 stranded 中类似为 a%b 的结构, 对应于 a 行 b 列的变量。

(10) VS: 用于参数化 VS\_input.txt 中的内容。其书写格式与 CS 类似。

(11) Vot\_S: 用于参数 Vot\_S.txt 中的内容。其变量名类似于 stranded 中类似为 a%b 的结构, 对应于 a 行 b 列的变量。

(12) Cur\_S: 用于参数 Cur\_S.txt 中的内容。其变量名类似于 stranded 中类似为 a%b 的结构, 对应于 a 行 b 列的变量。

(13) wind\_stranded: 这个还是用来设置参数化 Stranded.txt 中的内容。由于在不同斜槽时, stranded 区域的数目不同, 如果只是用 Strand 来设置初始电流, 那么每次修改分段的话, 这参数化文件都需要修改。而且如果 Strand 数目比较多, csv 文件中需要写的 Strand 内容也比较多。而用了 wind\_stranded 之后就可以利用 wind\_stranded.txt 中的内容间接修改 Stranded.txt。比如 1%4 指的是修改 wind\_stranded.txt 中的第一个绕组中所有的 stranded 区域, %4 指还是 Stranded.txt 中每行第 4 个参数 (初始电流)。

(14) wind\_solid: 这个同理是为了参数化 Solid.txt 中的内容。比如比如 1%3 指的是修改 wind\_solid.txt 中的第一个绕组中所有的 solid 区域, %3 指修改 Solid.txt 中每行第 3 个参数 (初始电流)。

(15) Time0: 用于修改 Time0.txt 中的内容, 第二行的 2、3 表示修改 Time0 中的第二个和第三个参数, 分别表示结束时间和时间间隔。在 Position 保持不变的情况下, 通过修改 Time0

可以改变电机的旋转速度，对于静止的问题可以通过修改 Time0 改变频率。

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Case	Var	Var	EQ	EQ	CS	CS	CS	Strand	Strand	Strand	Strand			
Case	id	iq	Im	aerfa		1	2	3	1%4	2%4	3%4	4%4		
1	0	0	$0 \sqrt{\sin}$	$\sin$										
2	0	0	$20 \sqrt{\sin}$	$\sin$										
3	0	0	$40 \sqrt{\sin}$	$\sin$										
4	0	0	$60 \sqrt{\sin}$	$\sin$										
5	0	0	$80 \sqrt{\sin}$	$\sin$										
6	0	0	$100 \sqrt{\sin}$	$\sin$										

(a) 案例一

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Case	Var	Var	Var	EQ	EQ	EQ	EQ	CS	CS	CS	wind_strar	wind_strar	wind_stranded	
Case	id	iq	p	d2r	thei	theB	theC	1	2	3	1%4	2%4	3%4	
1	0	0	0	$3 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						
2	0	0	10	$3 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						
3	0	18.384776	0	$3 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						

(b) 案例二

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Case	Var	Var	Var	EQ	EQ	EQ	EQ	CS	CS	CS	wind_soli	wind_soli	wind_solid			
Case	id	iq	p	d2r	thei	theB	theC	1	2	3	1%3	2%3	3%3			
1	0	0	0	$10 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						
2	0	0	15	$10 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						
3	0	0	30	$10 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						
4	0	0	45	$10 \pi / 180$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$	$\sin$						

(c) 案例三

图 4-35 输入参数文件设置

在参数化过程中，所需计算步数，转子每次转过的机械角度通过 position.txt 等先设置好，参数化过程中并不修改。

此外，最新添加了多线程并行化的功能，对于这种参数化扫描问题，可以用多进程并行化的方法提高计算速度，在对话框中输入进程数即可。输入进程数的原则：

- (1) 进程数小于等于计算 case 总数；
- (2) 有的电脑 6 核，有 12 线程，最大进程数是 12 而不是 6，但是加速比并不是随着核数线性增加的，主要因为计算过程中还存在大量 IO；
- (3) 如果扫描计算过程中还需要电脑进行其他操作，不要将所有核用满，否则容易卡。

#### 4.4. 通过 step 格式文件直接导入发卡绕组模型

相关文件保存在了...\\tutorial\_3.0\\prius\_import 中。配有详细视频教程，在此就不再详述操作步骤。

这个例子演示了如何直接通过 gmesh 导入 step 格式文件，在软件中建立仿真模型。图 4-36 中给出了模型截面图，而图 4-37 中给出了对应的电路连接图。图 4-38 中给出了空载磁链，图 4-39 中给出了 3000r/min 时计算空载铁耗，图 4-40 中给出了空载磁密分布图。

表 3 Prius2017 参数汇总

外径	轴长	转子外径	气隙长度	母线电压	最大转速
215 mm	61 mm	140.4 mm	0.7 mm	600 V	17000 rpm
功率	开关频率	最大电流			
53 kW	10 kHz	290 A			

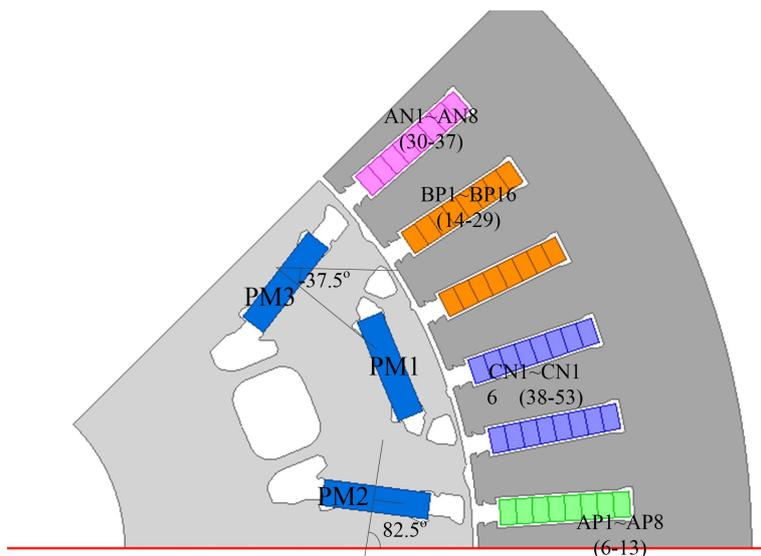


图 4-36 prius2017 截面图

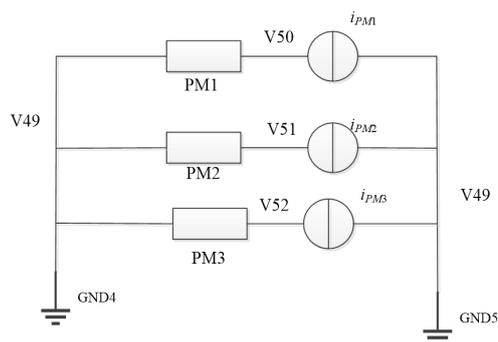
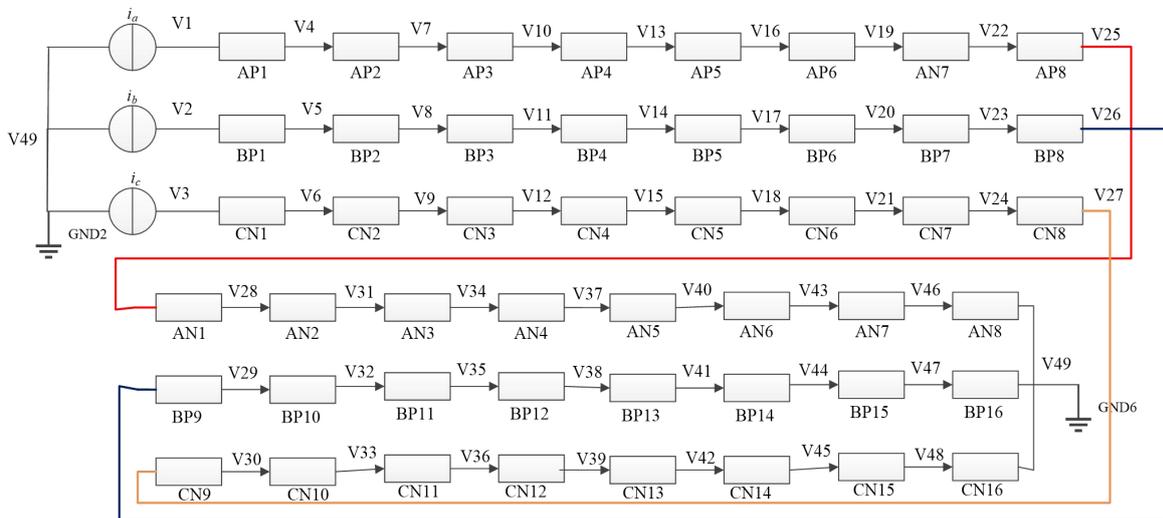


图 4-37 三相电流源供电电路图

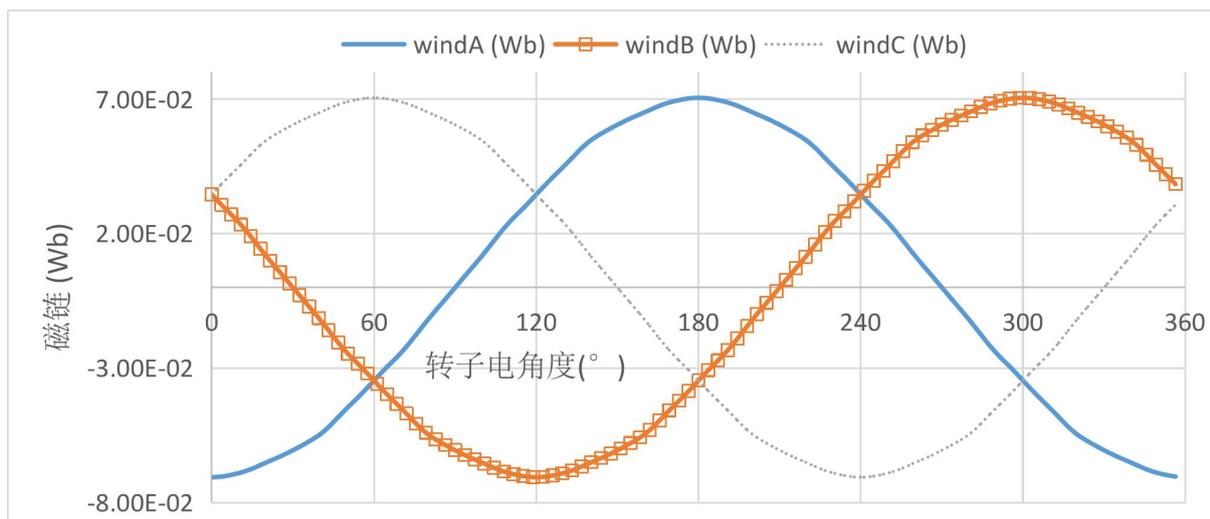
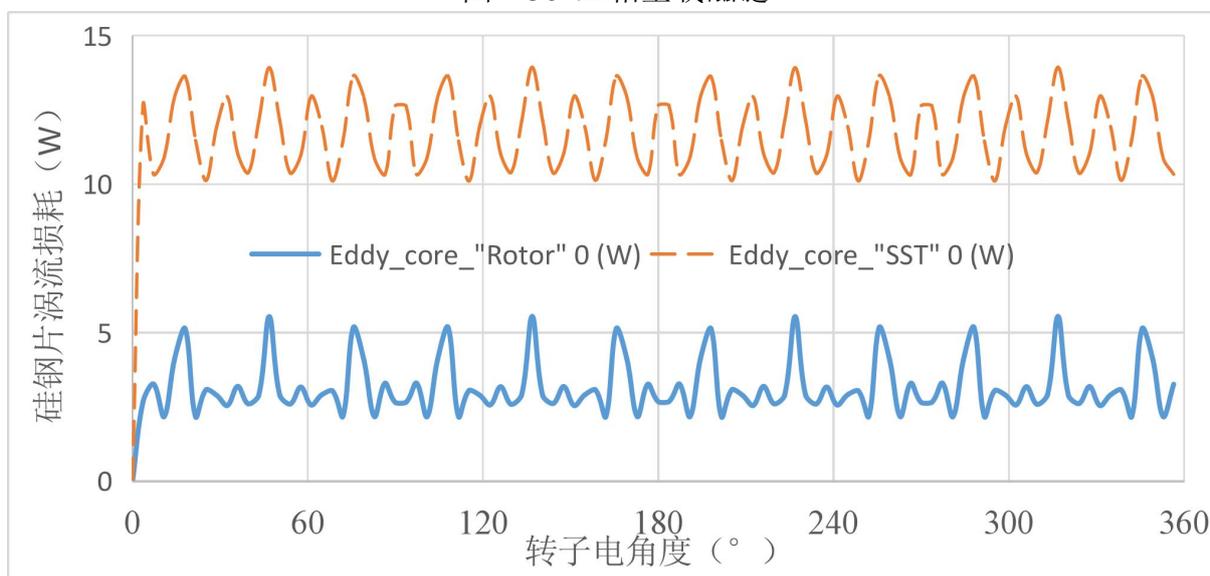
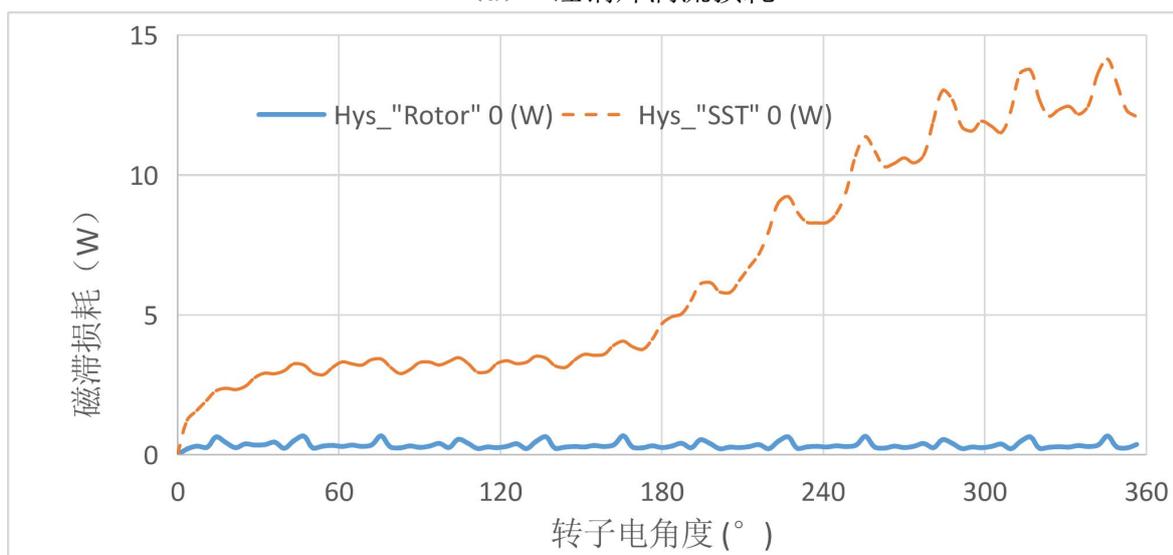


图 4-38 三相空载磁链



(a) 硅钢片涡流损耗



(b) 硅钢片磁滞损耗

图 4-39 3000rpm 时空载时的硅钢片磁滞涡流损耗

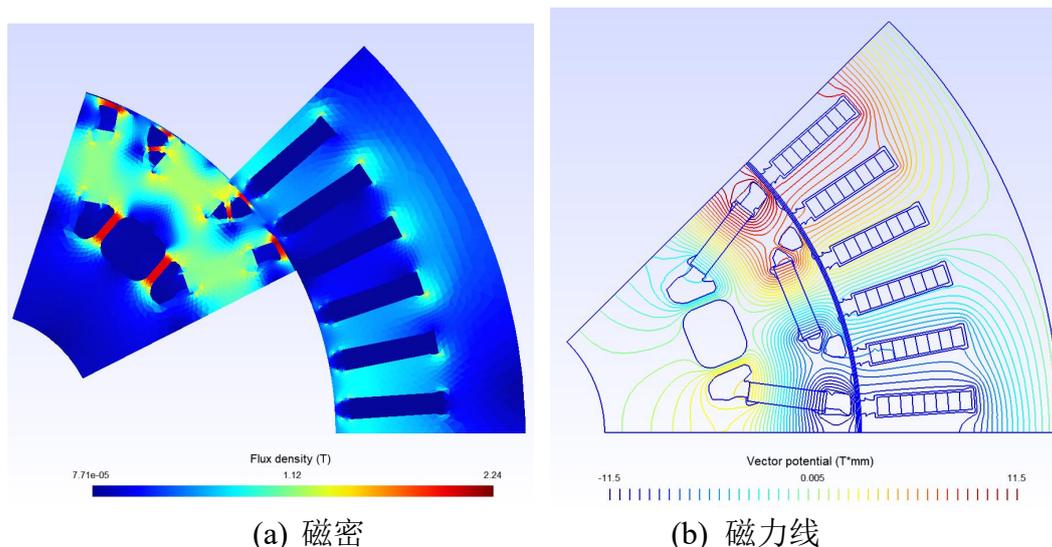
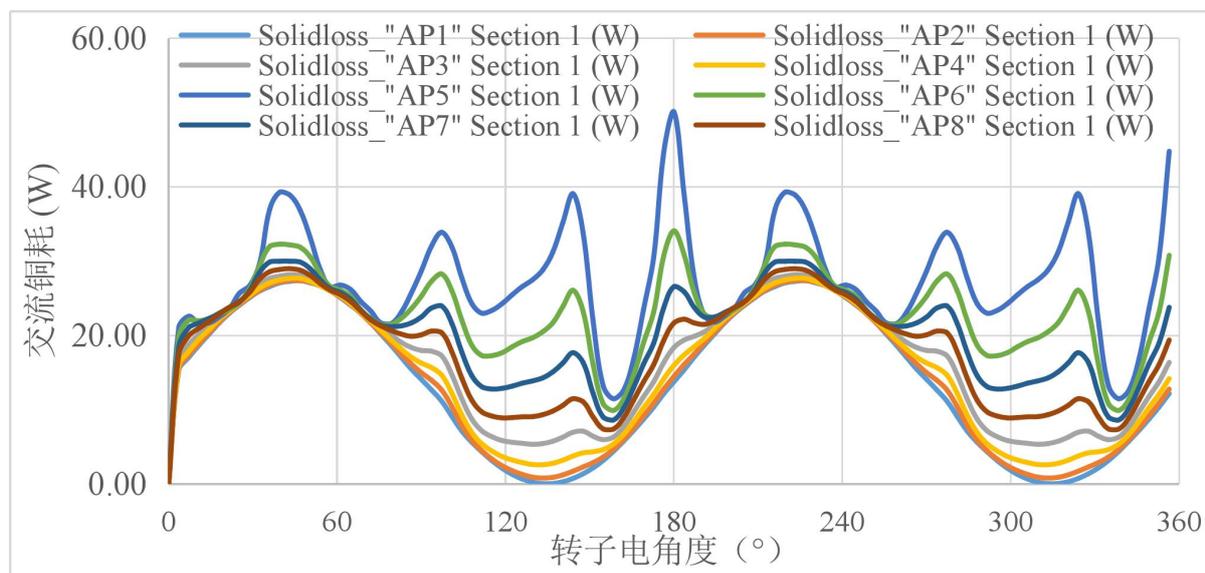
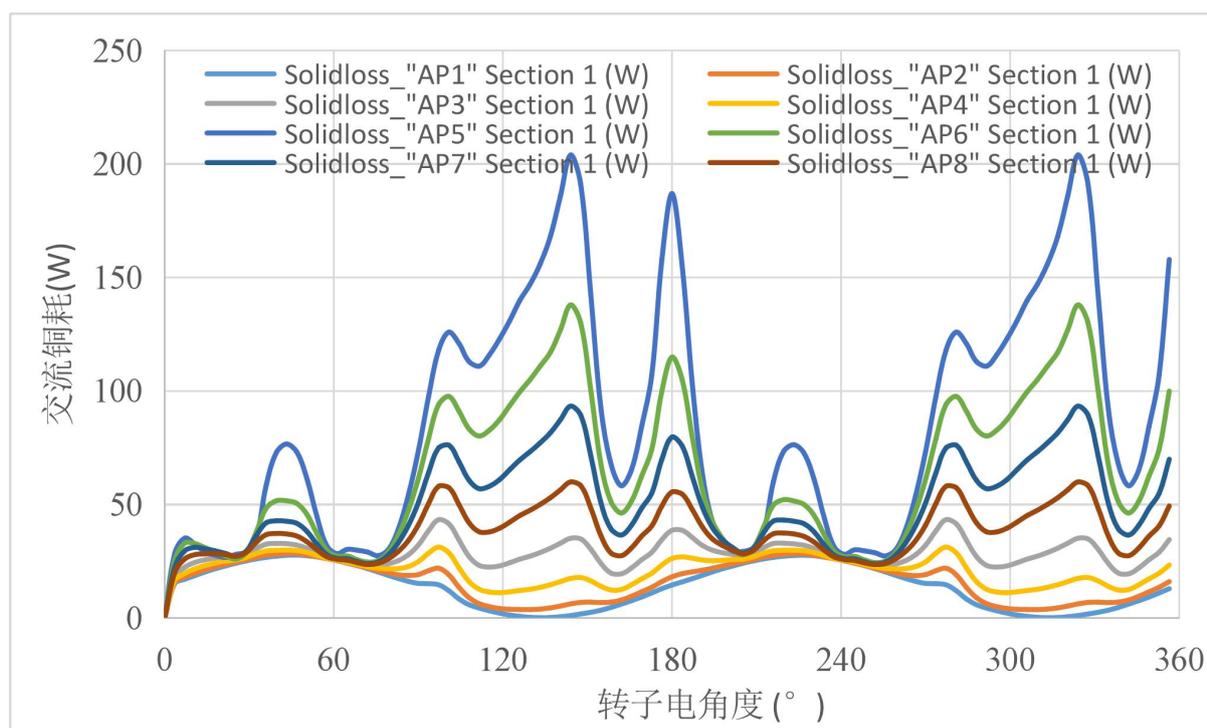


图 4-40 空载磁力线、磁密分布图

#### 4.4.1. 运用快捷插件计算不同工况下绕组交流铜耗

对于发卡绕组，运用有限元法计算槽导体的交流铜耗还是比较容易的。这里介绍应用电流源自动生成快速插件计算不同工况下交流铜耗的例子，相关程序保存在了...tutorial\_3.0\prius\_AC\_copper中。这个附有配套视频，操作步骤就不在此详述了。主要就是利用“8-2. Dq 式设置三相电流源”。





(b) 12000rpm

图 4-41  $i_d=-100\text{A}$ 、 $i_q=100\text{A}$  时不同转速下计算的交流铜耗

## 4.5. PWM 线电压供电下对 Prius2017 进行瞬态有限元仿真

### 4.5.1. 正弦电流供电下仿真确定 $d$ 、 $q$ 轴电压

选取工作点  $n=3000\text{r/min}$ ,  $i_d=-34.84\text{A}$ ,  $i_q=49.58901\text{A}$  为例进行分析。首先进行正弦供电下的仿真。在 (3) 4.4 节建立的案例基础上, 直接使用快捷插件生成  $dq$  轴电流。单击“8.2a.dq 式设置三相电流源”, 弹出 `idq_input.xlsx` 文件, 按照提示在其中输入相应参数即可, 关闭 `idq_input.xlsx`, 单击“8.2b.dq 式生成三相电流源”, 会更新对应 `Time0.txt`、`Position.txt`、`CS_input.txt` 等文件。这些快捷插件的本质都是根据输入去修改第 5 章中的 `txt` 文件, 因为程序最后运行时读取的都是这些 `txt` 文件, 这些快捷插件的目的只是为了操作方便, 不然比如改了  $dq$  轴电流的时候需要重新去算  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ , 修改了转速的时候需要改 `time0.txt` 和 `position.txt`, 使用起来特别繁琐。

	A	B	C	D	E	F
1	电机转速 (r/min):	3000				
2	电机极对数p:	4				
3	一个电周期步数:	90				
4	总步数:	90				
5	d轴初始超前A轴角度thetai(°):	180				
6	d轴电流:	-34.84				
7	q轴电流:	49.58901				
8	ABC三相电流源在Cur_S.txt中的	1	2	3		
9	绕组类型(solid or stranded):	solid				
10	说明:	iA=id*cos(thetae)-iq*sin(thetae)				
11		iB=id*cos(thetae-2*pi/3)-iq*sin(thetae-2*pi/3)				
12		iC=id*cos(thetae-2*pi/3)-iq*sin(thetae-2*pi/3)				
13		thetae=p*thetam+thetai				
14		thetam是转子机械角				
15						

图 4-42 idq\_input.xlsx 文件

在运行结束后,需要按照(9)4.2 节的方式计算 dq 轴电压,为生成 PWM 电压做准备。在一个点的计算结束后,点击“2、后处理与结果”中的“(6a)设置 d 轴与 A 轴夹角”,弹出图 4-43 所示的文件,在其中输入的参数中填入对应的值,关闭该文件,重新点击“(6b)计算 dq 轴电压与磁链”,会重新弹出计算得到的 dq 轴磁链与电压。这将作为下一节生成 PWM 电压的输入。

本章对应工作文件夹为..\tutorial\_3.0\prius\_SCS。

	A	B	C	D	E
1	d轴与A轴初始夹角(°):	180 (输入, 由空载反电势确定)			
2	Phase resistance(Ω):	0.025 (输入)			
3	并联支路数:	1 (输入)			
4	电机转速(r/min):	3000 (输入)			
5	极对数:	4 (输入)			
6	A、B、C三相磁链在flux.	1	2	3 (输入)	
7	d轴电流(A):	-34.84			
8	q轴电流(A):	49.58901			
9	d轴磁链(Wb):	0.0445135			
10	q轴磁链(Wb):	0.1287842			
11	d轴电压(V):	-162.706			
12	q轴电压(V):	57.176977			
13	端部漏感(H)	1.00E-05 (输入)			
14					
15					

图 4-43 dqinform.xlsx 文件

#### 4.5.2. PWM 电压生成与以 PWM 线电压为输入的瞬态有限元计算

为了进行 PWM 线电压为输入的瞬态有限元仿真计算,必须要搭建电压源供电下的电路图,如图 4-44 所示。这样的电路搭建需要通过修改\*\_TS2d.xlsx 中的 circuit 表单中的内容完成。本小节的内容在文件夹/tutorial\_3.0/prius\_PWM 中。关于具体如何通过这样的电路图填写对应的 circuit 表单,请参见第三章和第 7 章的内容,并且参见 prius\_PWM

文件夹中的 prius\_TS2d.xlsx 文件，在此不再赘述。

理论上讲，除了要在 circuit 表单中输入电路的信息之外，还需要输入每步的电压和绕组及电感上的初始电流，以及修改 time0.txt 和 position.txt，这个过程比较繁琐，具体原理参见图 4-16 Yamazaki 计算变频器供电下损耗流程。为此，本软件同样提供了瞬态 SVPWM 电压的自动生成功能，注意自动生成的电压目前仅有 SVPWM 电压，如果用户想要研究 DPWM 等新型调制方式，可将其直接通过\*\_TS2d.xlsx 输入。在正确输入了包含电路信息的 prius\_TS2d.xlsx 文件，并将其转化为 txt 文件之后，点击 8-4.a 设置 PWM 电压源参数，会弹出图 4-45 所示的 Excel 文件，在其中填入参数后，并检查 dqinform.xlsx（来自于 4.5.1 节计算得到）是否正确。然后点击“4b.PWM 电压数据生成”即可生成生成保存 PWM 电压的 txt 文件，然后进行计算即可。

图 4-47~图 4-49 中给出了给出了正弦电流供电下计算的转矩、绕组铜耗与永磁体涡流损耗与 800V 母线的 PWM 电压供电下计算对比。其中需要对计算的转矩结果进行说明，PWM 电压供电下的转矩并不平稳，这是因为本软件采用设定了初始电流后，进行一个周期开环 PWM 线电压为输入、假设电机匀速旋转的瞬态计算，这时候未进行转矩闭环，因此无法保证转速是平稳的。但由于设置了初始电流，转矩的波动低次波动有限，而 PWM 高频谐波电压引起的高频转矩波动则是真实存在的，这种方法计算 PWM 谐波损耗的正确性已经得到了前人的充分证明。

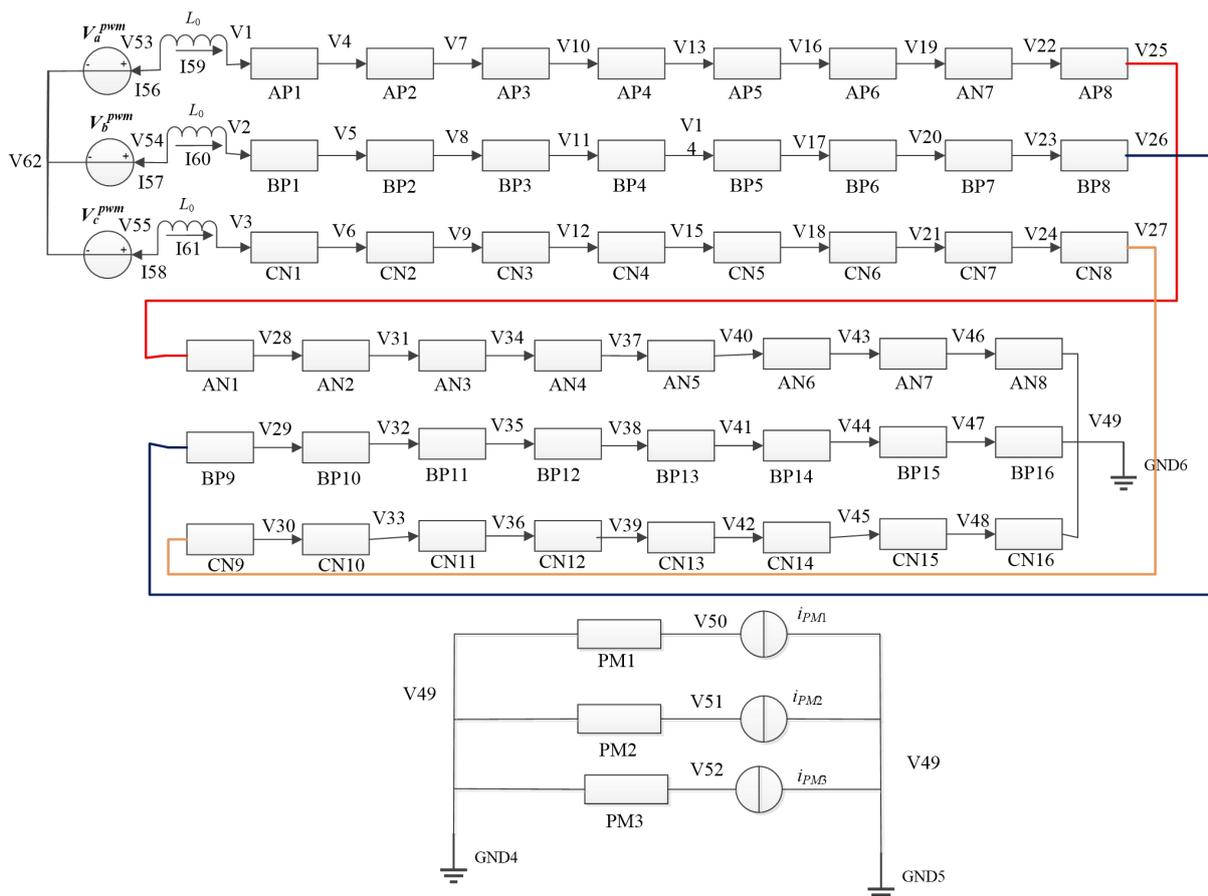


图 4-44 电压源供电电路图

B8									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	
直流母线电压(V):	800								
开关频率(Hz):	10000								
一个周期点数:	2000								
VS_input.txt中输入电压对	1	2	3						
绕组类型(solid or strandsolid									
瞬态计算电周期数:	1								
ABC三相漏感在Leak.txt中的	1	2	3						

图 4-45 PWM 电压源参数设置

PWM线电压为输入时计算得到的相电压与电流

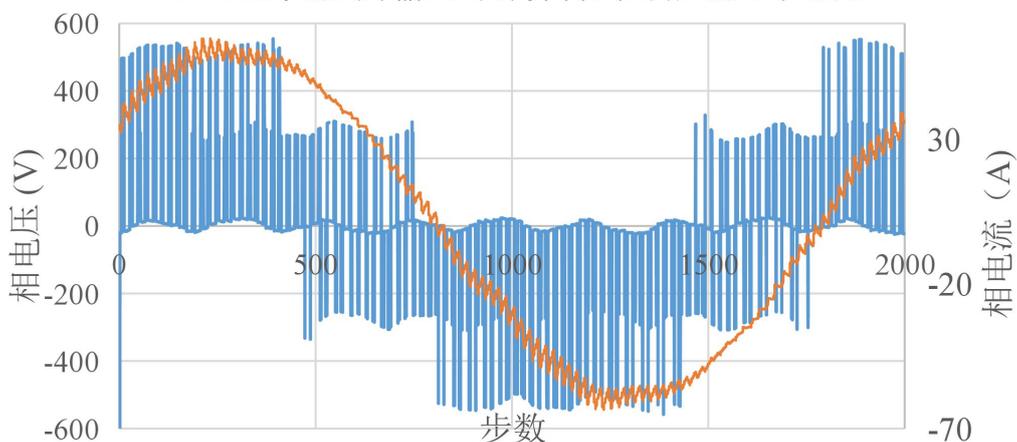
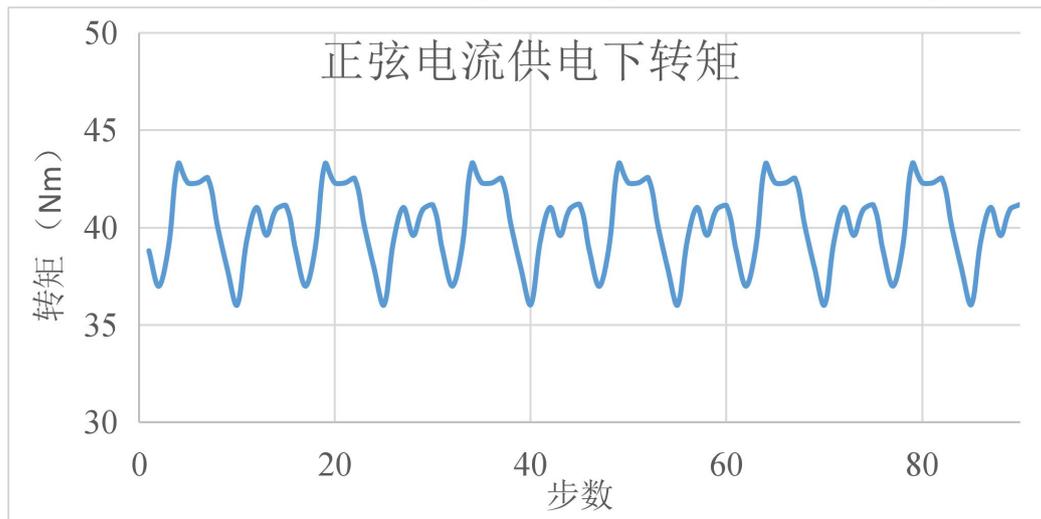
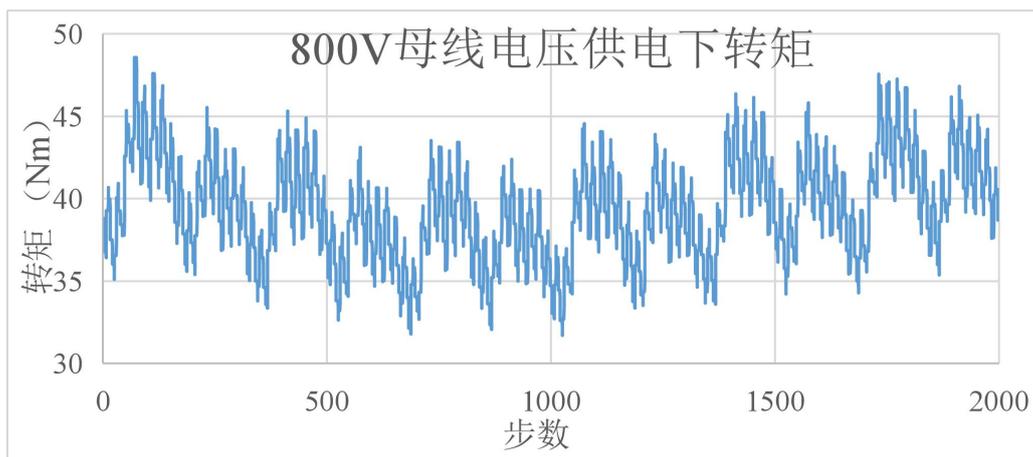


图 4-46 瞬态有限元计算得到的相电压与相电流波形 (800V PWM 电压输入)

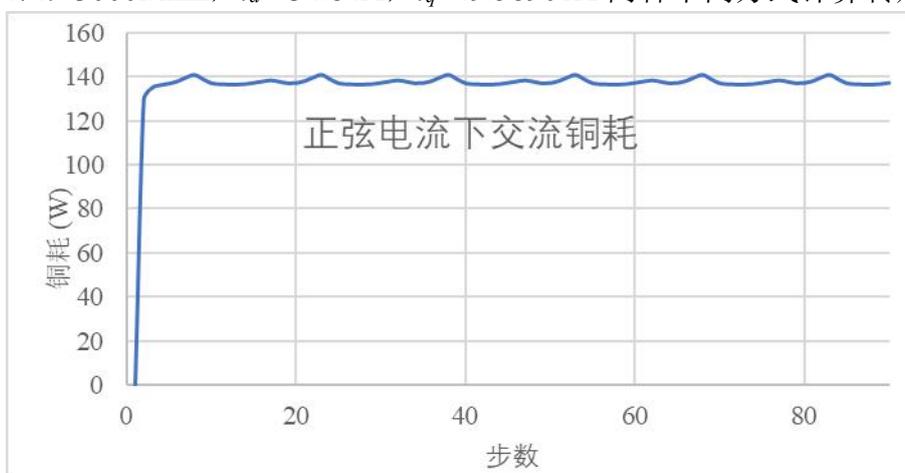


(a) 正弦电流为输入瞬态仿真

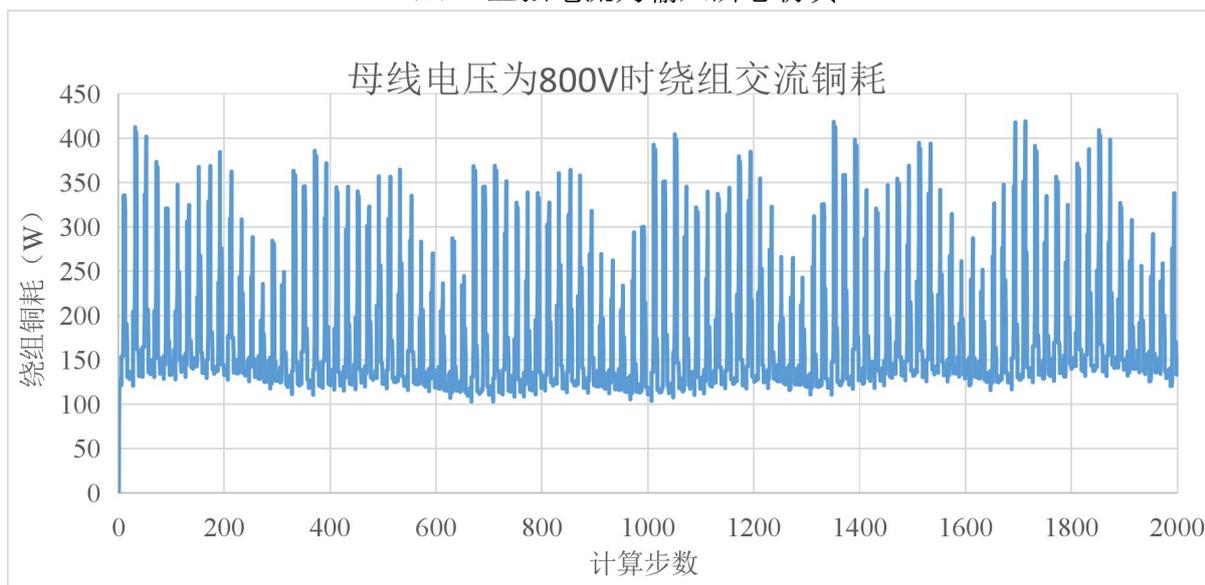


(b) PWM 线电压为输入仿真

图 4-47  $n=3000\text{r/min}$ ,  $i_d=-34.84\text{A}$ ,  $i_q=49.58901\text{A}$  两种不同方式计算转矩对比

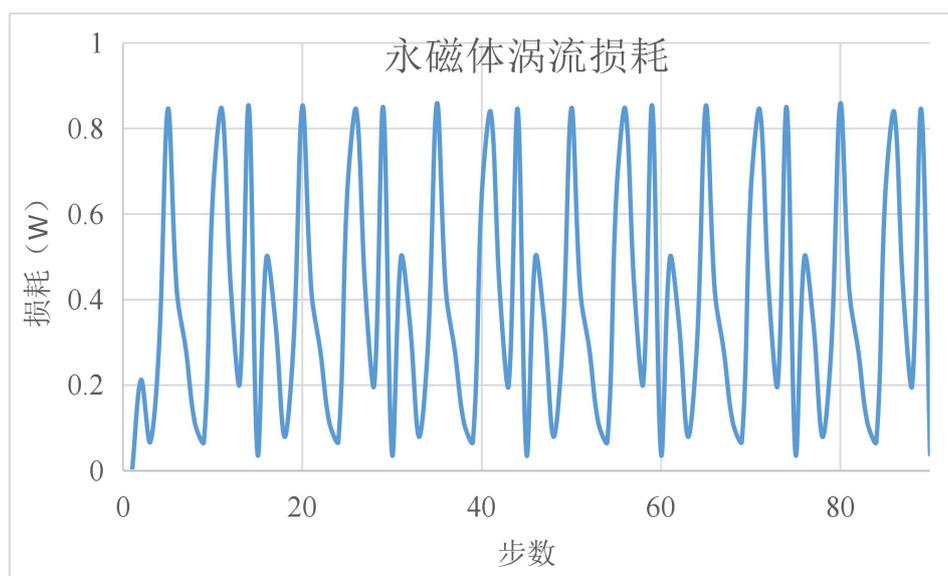


(a) 正弦电流为输入瞬态仿真

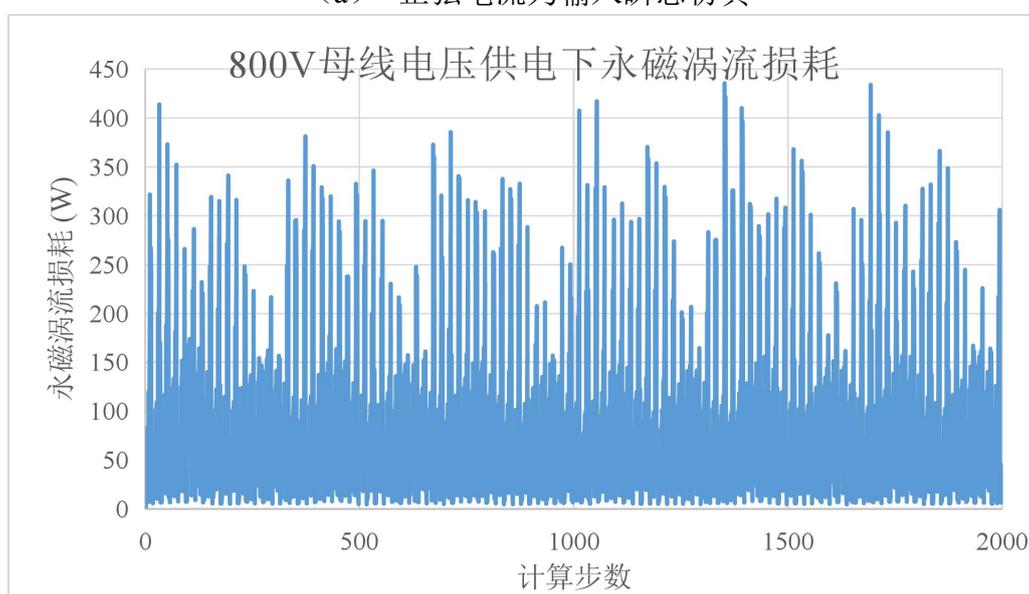


(b) PWM 线电压为输入瞬态仿真

图 4-48  $n=3000\text{r/min}$ ,  $i_d=-34.84\text{A}$ ,  $i_q=49.58901\text{A}$  两种不同方式计算交流铜耗对比



(a) 正弦电流为输入瞬态仿真



(b) PWM 线电压为输入瞬态仿真

图 4-49  $n=3000\text{r/min}$ ,  $i_d=-34.84\text{A}$ ,  $i_q=49.58901\text{A}$  两种不同方式计算永磁体涡流损耗对比  
 表 4 中总结了不同方法计算损耗对比, 可以看出变频器供电下损耗显著提升, 这是正弦电流供电下的计算无法得到的, 而且采用母线电压为 800V 时瞬态计算的谐波损耗明显高于 400V 时的计算值。采用 Simag 计算 2000 步瞬态有限元约需要 16.7min。

 表 4  $n=3000\text{r/min}$ ,  $i_d=-34.84\text{A}$ ,  $i_q=49.59\text{A}$  时不同瞬态方法计算结果对比

	转矩/Nm	铁耗/W		铜耗/W	永磁体涡流损耗/W	计算时间/min
		磁滞	涡流			
正弦	40.1	53.8	65.7	136.2	0.39	1.1
400V PWM	40.07	56.3	113.8	148.4	21.7	16.7
800V PWM	39.38	57.7	212.7	171.2	87.8	16.7

6753 个节点 13064 个一阶三角单元

#### 4.6. 考虑 PWM 谐波损耗的 Prius2017 效率图计算

下面继续以 Prius2017 这个电机为例, 演示如何扫描不同  $d$ 、 $q$  轴电流激励下的电机

特性并计算正弦电流供电下、及其 PWM 线电压供电下的电机工作区特性与效率图等。

相关数据放在了...\tutorial\_3.0\prius\_effmap 中。

### 4.6.1. 参数化扫描

首先可以将 4.4 节已经调试好的单一工作点计算的文件夹复制，并重命名为 prius\_effmap，将工作路径切换到当前文件夹，可以首先进行一下单一工作点的计算以确保模型的正确性。扫描不同工况下的电机磁链、转矩信息等，理论上可以通过(9)4.3 节参数化扫描的方法进行。考虑到每次都需要用户进行繁琐的参数设置，这里增加了根据电机最大电流、转速信息自动生成扫描 csv 文件的功能。

首先，在确保了三相正弦电流供电的有限元模型正确的前提下，将选项卡切换至“C. 参数化分析”，点击 2-A(1)设置 Sweap\_inform.xlsx 按钮，如图 4-50。这时候会产生如图 4-51 所示的参数化扫描文件，按提示进行设置即可。设置完毕之后，关闭该文件。点击“（2）生成 speed\_sweap.csv 和 idq\_sweap.csv”按钮，这时候会生成两个 csv 文件，idq\_sweap 文件是用于不同 dq 轴电流供电下扫描，扫描转速取为最高转速的一半，另一个文件 speed\_sweap.csv 是用于不同转速下的扫描，主要用于确定交流铜耗系数随频率的变化。点击按钮“（3）转速扫描计算”和“（4）dq 轴电流扫描计算”可以分别进行 dq 轴电流供电下的扫描和转速扫描；也可以直接点击（3-4）一键所有扫描计算同时进行两种情况下的扫描。这个计算耗时过长，通常需要几个小时，这主要取决于与扫描点数和分段斜极数。在扫描计算结束后，点击“查看 speed\_res.csv”按钮查看转速扫描结果；点击“查看 idq\_res.csv”按钮查看 d、q 轴电流扫描结果。这些结果按照磁链、转矩、电压电流、粗导体涡流损耗、硅钢片涡流损耗、硅钢片磁滞损耗的顺序依次排列。



图 4-50 设置扫描参数

	A	B	C	D
1	线电流最大有效值(A):	160		
2	最高转速 (r/min):	17000		
3	一个电周期内采样点数 (6的倍数):	90		
4	计算总点数 (取一个电周期):	90		
5	极对数:	4		
6	绕组类型(solid或stranded):	solid		
7	d轴超前A轴电角度(°):	180		
8	ABC三相电流源在Cur_S.txt中编号:	1	2	3
9	ABC三相绕组在Wind_*.txt中编号:	1	2	3
10	扫描dq电流的点数 (建议10~15):	10		

图 4-51 Sweap\_inform.xlsx

### 4.6.2. 工作区分析

在进行完转速扫描与  $d$ 、 $q$  轴电流扫描之后，即可进行工作区的计算。点击 B(1) “设置 Work\_inform.xlsx”，会弹出如图 4-53 所示的 Excel 表格。按照提示填入表格即可，MAP 转速间隔设定了计算的转速间隔，而转矩步长则设定了转矩间隔。这里的相电阻主要用于确定工作区时考虑绕组上的压降，并非用铜耗计算。端部漏感可以用软件自带的小工具确定，端部漏感这个参数对于正确确定工作区的电流是至关重要的。当采用 SVPWM 控制策略时，在线性区最大调制比为 1.15。

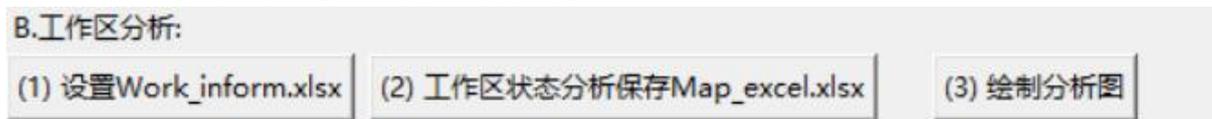


图 4-52 工作区分析用相关按钮

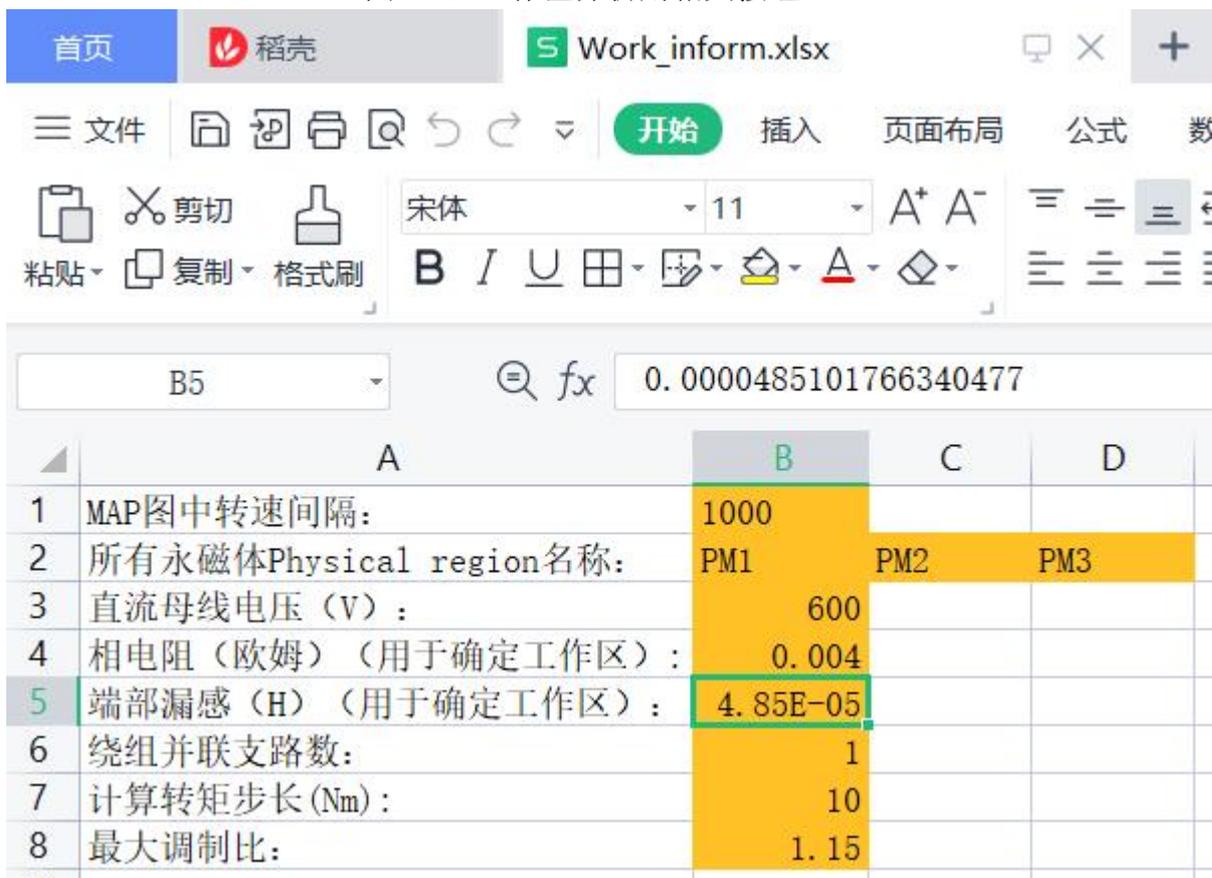


图 4-53 Work\_inform.xlsx 相关内容

在完成上述设定之后，点击“（2）工作区状态分析保存至 Map\_excel.xlsx”，运行这个按钮时会对“speed\_res.csv”和“idq\_res.csv”这两个文件进行分析。获得不同  $d$ 、 $q$  轴电流激励下的磁链、转矩信息，此外根据 MTPA 算法和高速区弱磁 MTPV 算法确定不同转矩、转速下的基波电流与电压。Map\_excel.xlsx 中包括了有限元扫描计算所获得的全部信息。ID\_X、IQ\_Y 分别表示  $d$ 、 $q$  轴电流构成的网格点，PSID\_Z、PSIQ\_Z 和 TOR\_Z 表示对应  $d$ 、 $q$  轴磁链与转矩。用这些数据可直接绘制出磁链、转矩图。PML\_Z、ACOP\_Z、CED\_Z、HYS\_Z 是在最高转速的一半扫描时得到的永磁体涡流损耗、槽导体涡流损耗、硅钢片涡流损耗和硅钢片磁滞损耗图。id\_all、iq\_all、vd\_all、vq\_all 是不同转矩、转速下的  $d$ 、 $q$  轴基波电流和  $d$ 、 $q$  轴基波电压。AC\_R\_loss 是不同转速下，在  $id=-I_m/2$ 、 $iq=-I_m/2$  扫描的交流铜耗与交流电阻。Envelop 保存不同转速下所能达到的最大转矩及对应电流。

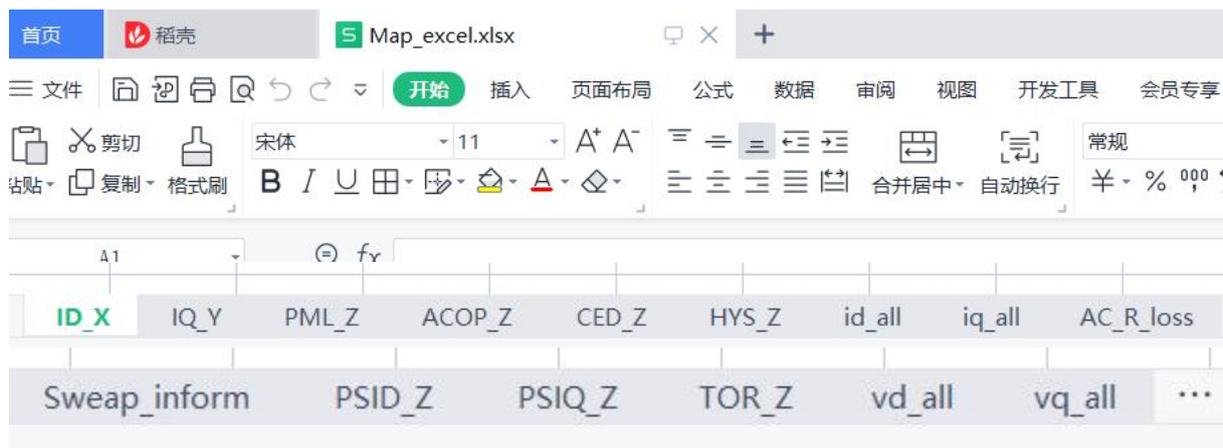
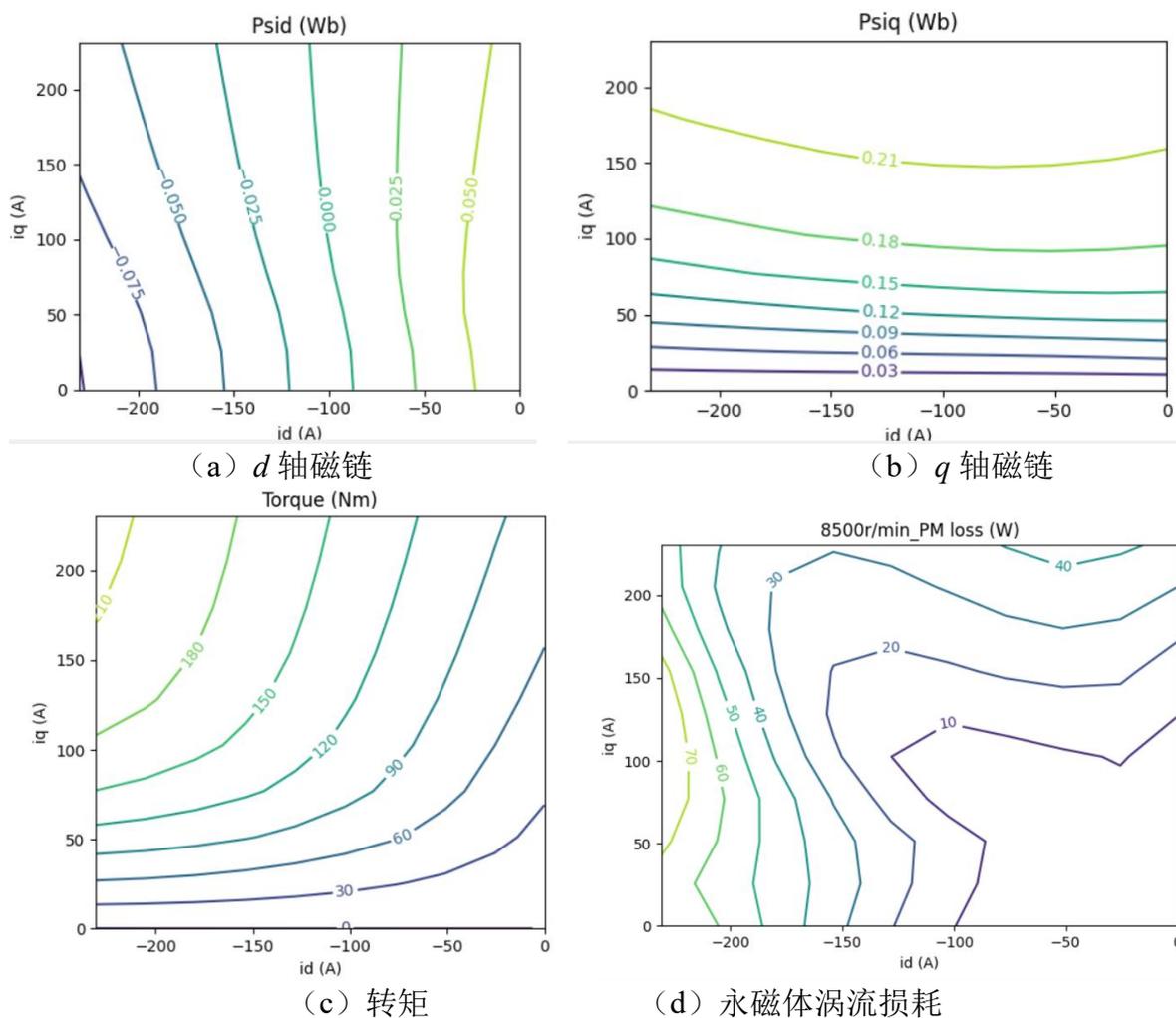
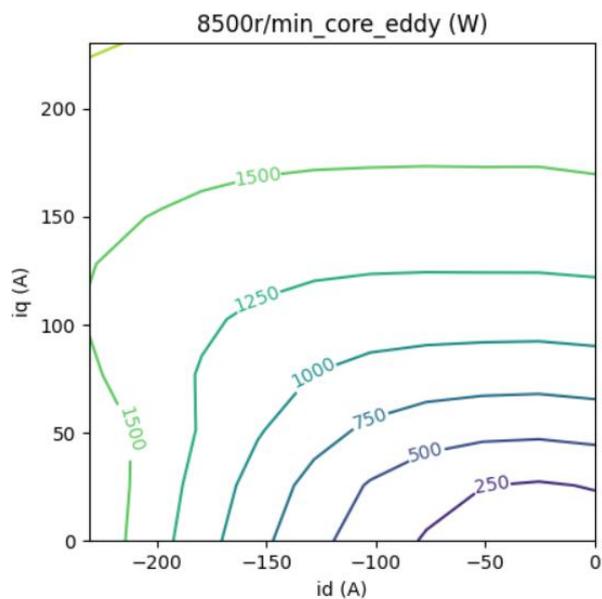


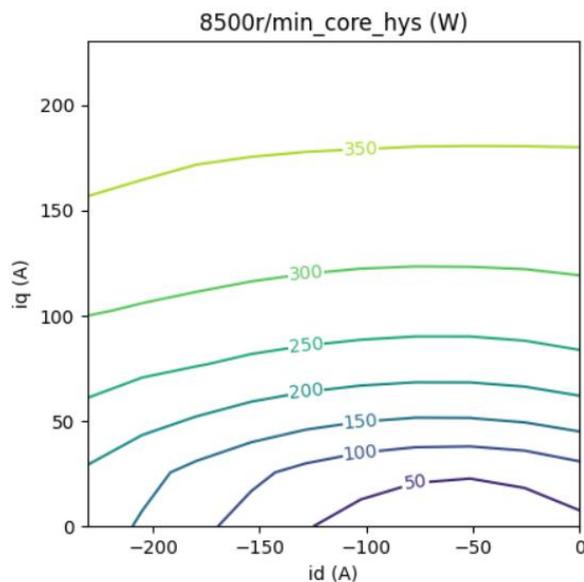
图 4-54 Map\_excel.xlsx 内容说明

为了方便查看这些数据，在正确生成 Map\_excel.xlsx 之后，点击“（3）绘制分析图”即可查看 Map\_excel.xlsx 中数据生成的图片，如图 4-55 所示。

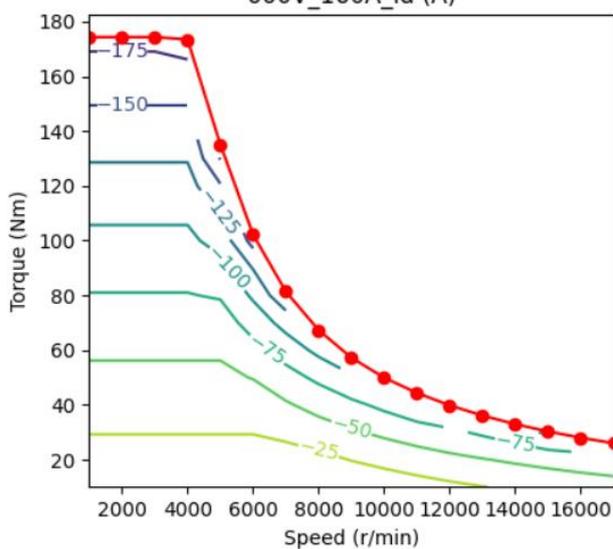




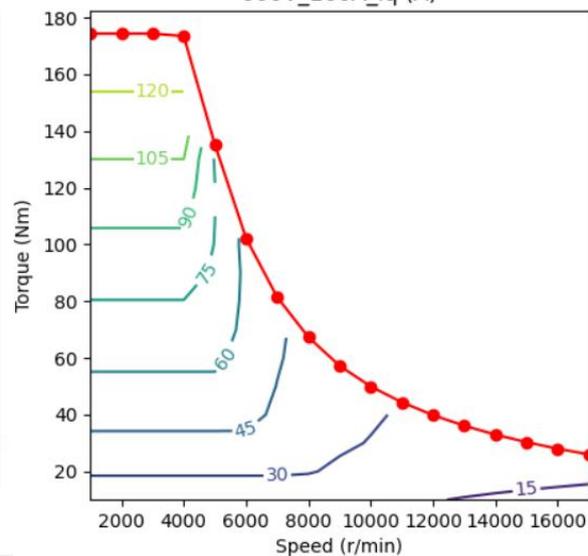
(e) 硅钢片涡流损耗



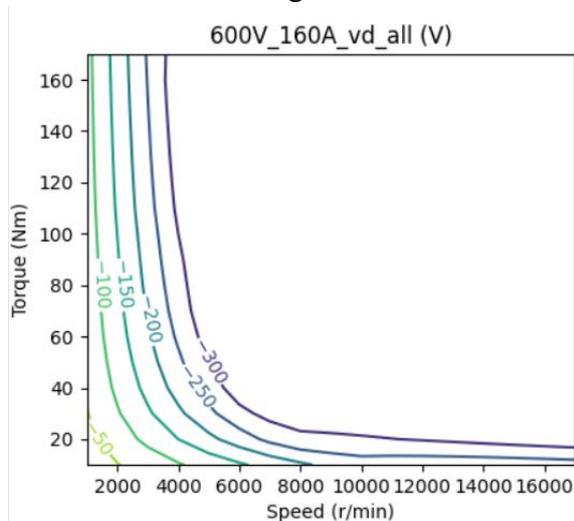
(f) 硅钢片磁滞损耗



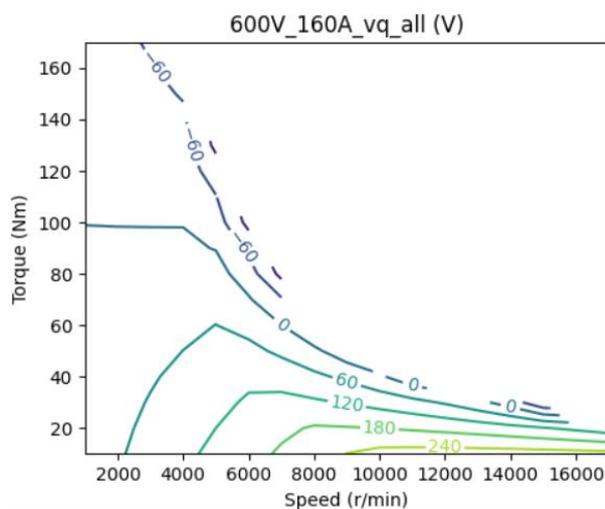
(g) d 轴电流



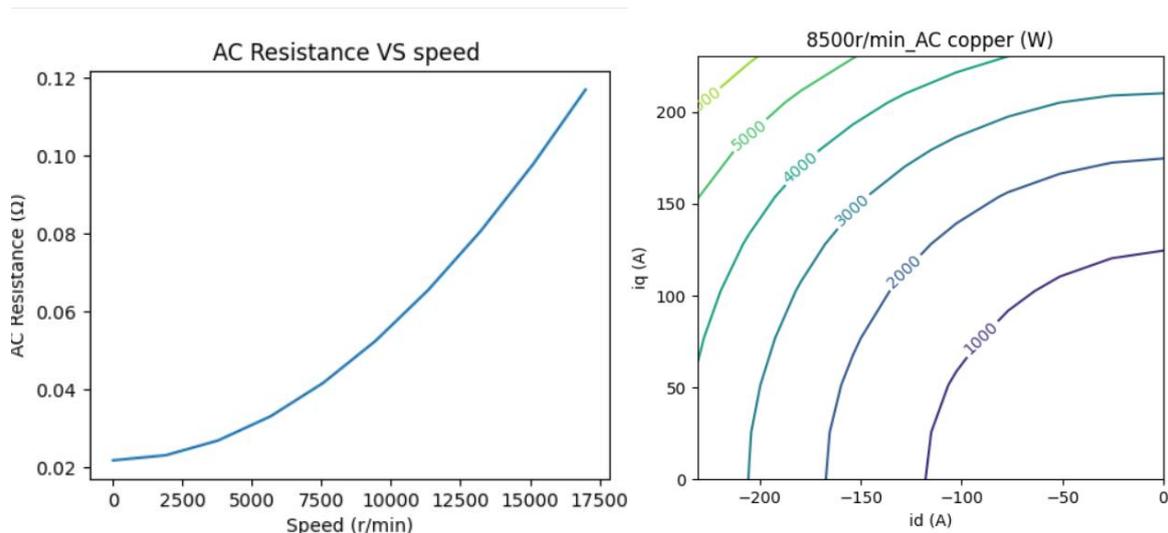
(h) q 轴电流



(i) d 轴电压



(j) q 轴电压



(k) 槽内交流电阻随转速上升 (l) 交流铜耗随 dq 轴电流变化

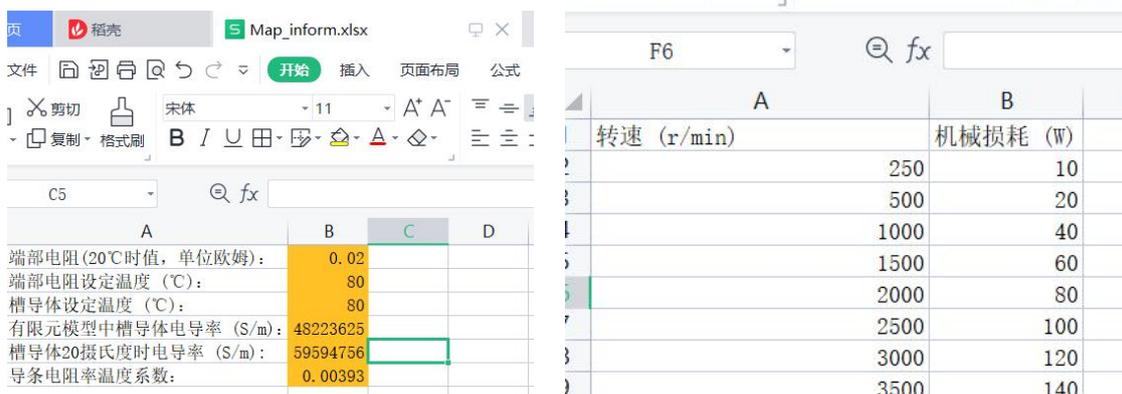
图 4-55 Map\_excel.xlsx 内容对应的图片

### 4.6.3. 正弦电流供电下效率图计算

在获取 Map\_excel.xlsx 中的数据之后，即可计算正弦供电下的电机效率，具体计算原理参见[11]。从操作层面讲，首先点击 C “(1) 设置 Map\_inform.xlsx”，弹出如图 4-57 (a) 所示的信息，在其中设置好端部电阻信息和绕组温度信息等。此外，在另一个 sheet 中输入不同转速下的机械损耗信息，这些都是计算效率图所必须的信息。



图 4-56 正弦电流供电下效率计算按钮



(a) 端部电阻温度等信息 (b) 机械损耗信息

图 4-57 正弦电流供电下效率计算按钮

设置完成后，关闭这些 Excel 文件，点击“计算损耗效率并保存至 Efflos.xlsx”按钮，可将计算结果保存到 SCS\_MAP\Efflos.xlsx。另外需要说明的是，为了方便用户保存数据，我们还将 Efflos.xlsx 另存在了 results\600V\_160A\_80.0°C\_80.0°C\_Efflos\_SCS.xlsx 中。注意这里在另存的时候我们将直流母线电压、最大电流、端部绕组温度和槽导体温度均保存在了文件名中，这样用户使用时在修改参数，如绕组温度，重新计算时会自动的将计算结果另存到另一个不同名称的文件中。这样可以防止用户自己另存数据时出错。同时还将效率图直接保存了下来，命名规则相同。

对于 Efflos.xlsx 中的数据，下面做简要说明，如图 4-58 所示。其中 Eff 表示横轴为电磁转矩、纵轴为转速时计算的效率图。Mech\_loss 是机械损耗、End\_loss 是端部绕组损耗、Edcore 是硅钢片涡流损耗、Hyscore 是硅钢片磁滞损耗、pm 是永磁体涡流损耗、pout\_all 是输出电磁功率、Tmech\_out 是输出机械转矩、Eff\_mech 表示横轴为机械转矩、纵轴为转速时的效率。关于机械转矩与电磁转矩之间的换算，详见[11]。

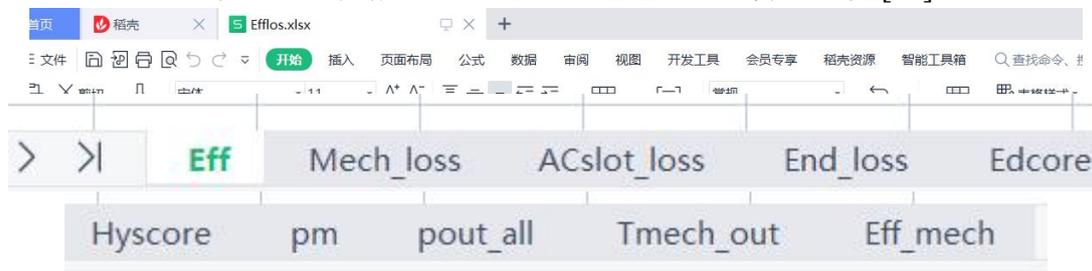
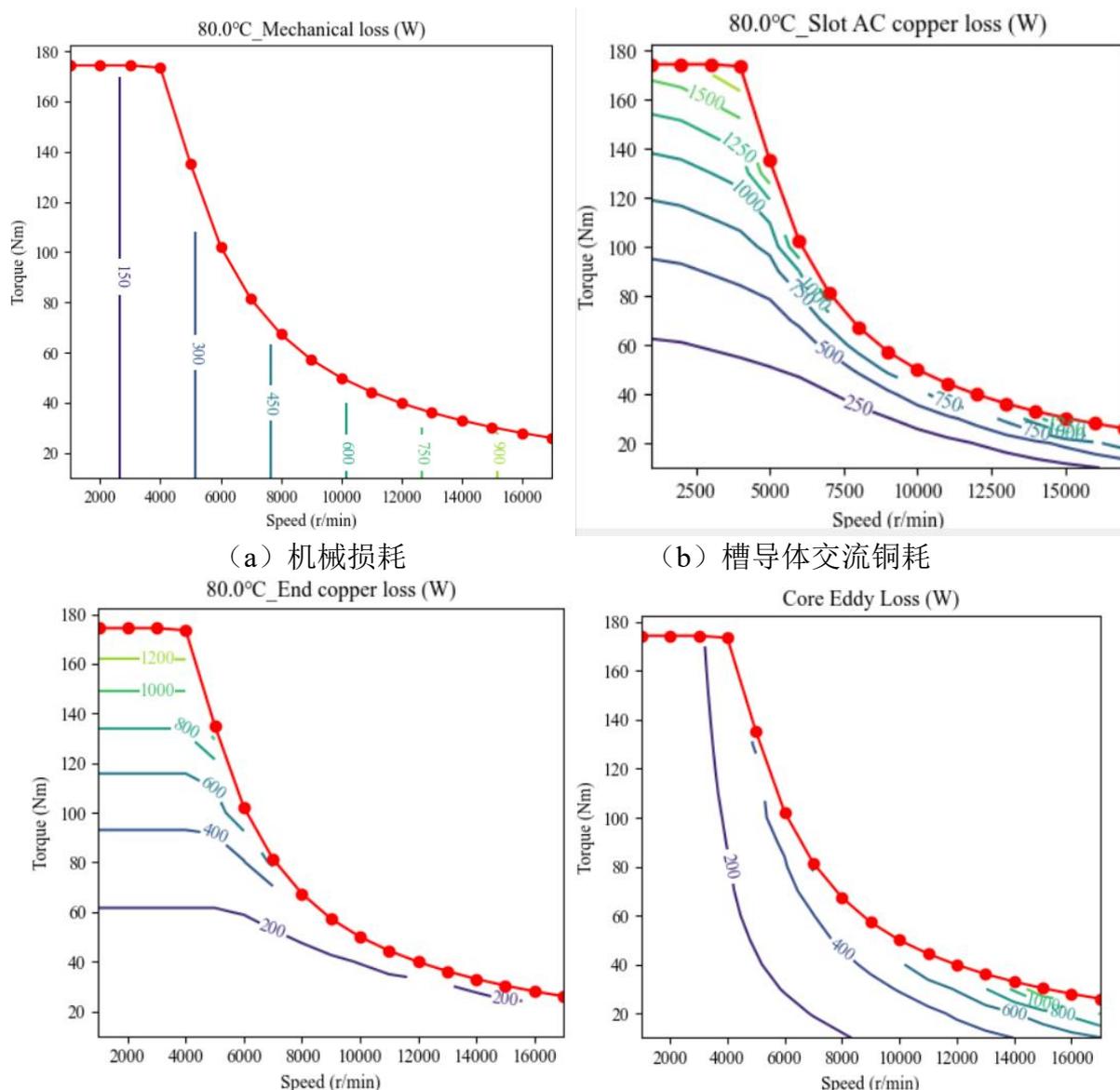


图 4-58 正弦电流供电下计算数据

点击“绘制损耗效率图”，可以生成图 4-59 的各种损耗效率图。其中以电磁转矩为纵坐标和以机械转矩为纵坐标的效率图都被给出，两者只在电机转矩较低时有比较明显区别。



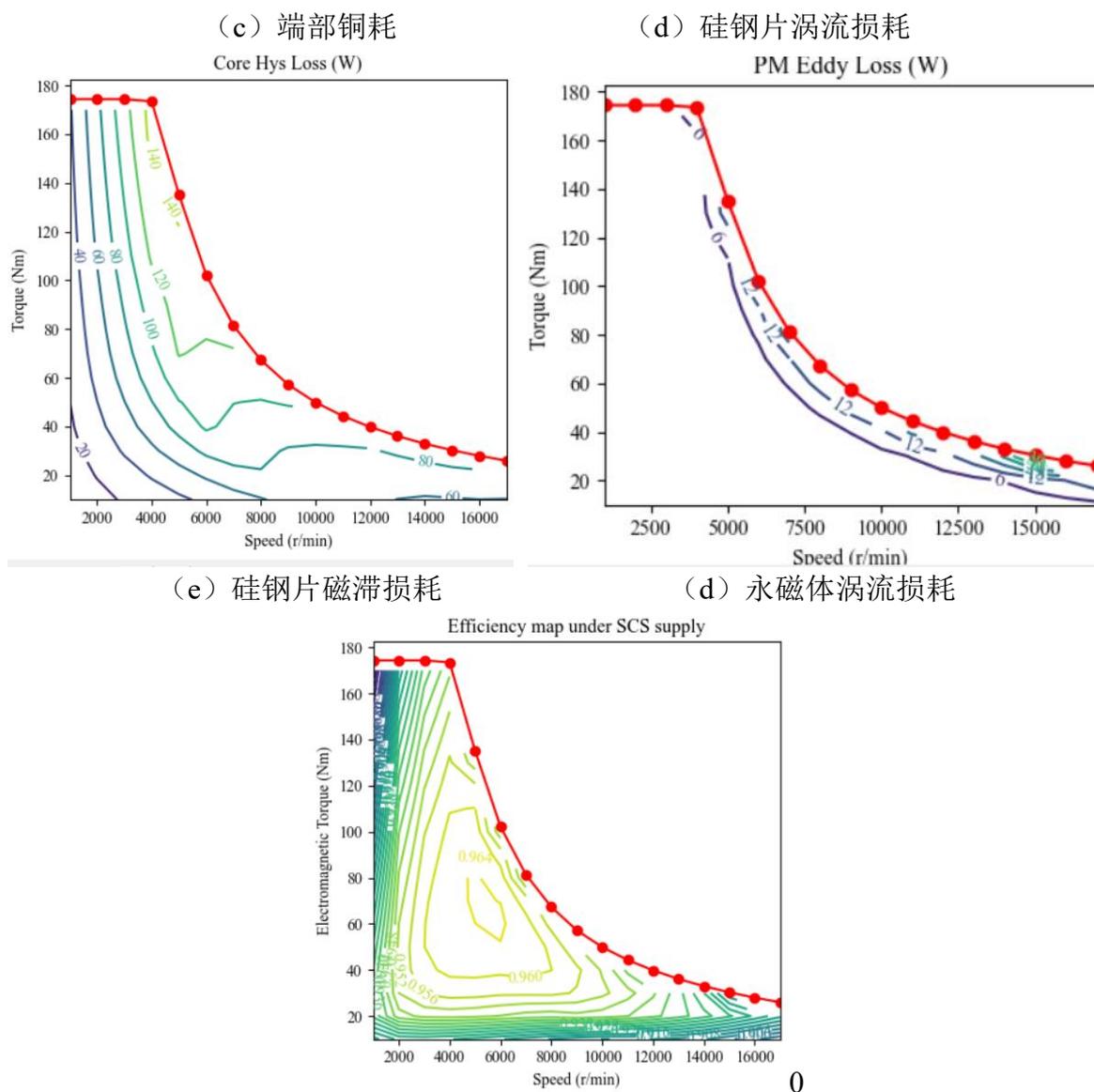


图 4-59 正弦电流供电下计算的损耗效率图

#### 4.6.4. PWM 谐波损耗计算及 PWM 电压供电下效率图计算

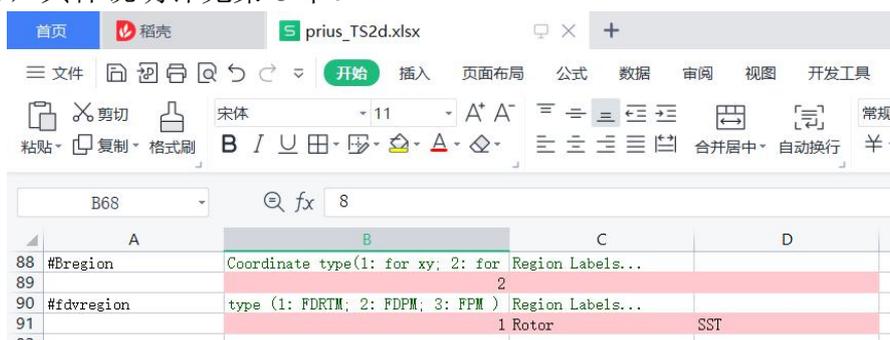
关于本软件快速计算 PWM 谐波损耗的原理已经在[11]中进行了详细介绍。下面详述操作过程。

##### (1) 搭建线性时谐场-路耦合分析模型

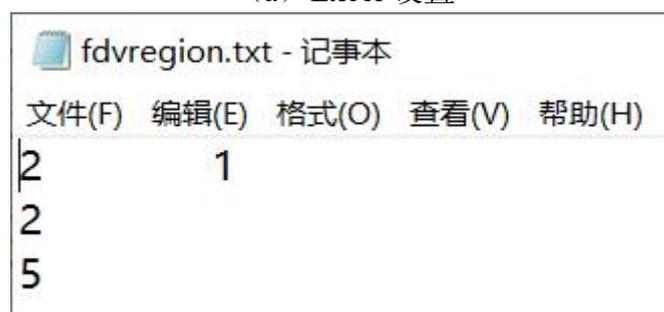
在进行基于冻结增量张量磁阻率法的线性-时谐场路耦合分析模型之前，首先要确保瞬态有限元计算中保存了每个硅钢片区域网格的增量张量磁阻率，如图 4-60 所示。在设置完成后，点击“读取 TS2d.xlsx 中数据转化为 txt”，更新所有的 txt。可点击“（2）冻结磁导率区域”查看 fdvregion.txt 区域，确保里面包含了所有硅钢片区域。可进行瞬态场计算，检查 Fdvout 文件夹中是否保存了冻结的增量磁导率。

下面需要搭建时谐场分析模型，关于时谐场模块，在第 8 章中有详细介绍。依次点击“（1）新建/打开 STHFEA”，建立进行时谐场分析的 STHFEA 文件夹，点击“（2）更新 msh 和 FDP 文件夹”将网格文件和冻结增量磁阻率文件复制到 STHFEA 文件夹中。然后点击“初始化 TH2d.xlsx”此时在 STHFEA 文件夹中会产生一个名为“geo 文件名

\_T2d.xlsx”的时谐场参数输入文件。点击“（4）打开 TH2d.xlsx”文件夹，按照提示输入参数即可，具体说明详见第 8 章。



(a) Excel 设置



(b) Txt 文件中对应数据

图 4-60 瞬态场计算中冻结增量张量磁阻率区域设置

二维电磁场-路耦合仿真软件SiMAG3.1(版权所有:朱洒, qq:747658302)

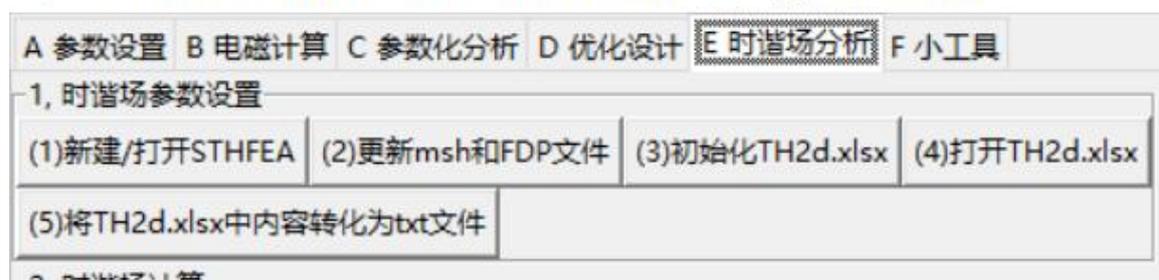


图 4-61 时谐场分析界面

在 TH2d.xlsx 的材料设置中，值得说明的是，对于采用了冻结磁导率的区域，其相对磁导率被设置为 0，如图 4-62 所示。此外，关于永磁体电导率的设置，文献[11]中给出了具体的修正原理。具体操作是运用选项卡 F 中的小工具，永磁体二维等效电导率计算。在永磁体轴向长度较短时，永磁体内部的涡流反应被大大削弱，通过增加二维模型中的等效电导率可近似模拟三维轴向分段的情况[10]，本软件利用文献[11]中的方法进行二维等效电导率的修正。如图 4-63 所示。设电机轴向分了 4 段，因此永磁轴向高度为 15m。三块永磁的宽度都近似认为是 14mm，需要指出的是，在实际的 Prius2017 电机中，永磁体切向方向也进行了分段，这里作为简单的示例并没有考虑。

#material	Region Label	Relative permeability	Conductivity (S/m)	Current density (A/m2)	Current density (Imaginary part) (A/m2)
	Air	1	0	0	0
	Rotor	0	0	0	0
	PM1	1.05	82778.87672	0	0
	PM2	1.05	82778.87672	0	0
	SST	0	0	0	0
	PM3	1.05	82778.87672	0	0
	AP1	1	48223624.91	0	0
	AP2	1	48223624.91	0	0

图 4-62 材料参数设置说明

2. 永磁体二维等效电导率计算

永磁体真实电导率(S/m): 625000    永磁体宽度(mm): 14    永磁体轴向高度(mm): 15    开关频率(kHz): 10.0    永磁体相对磁导率: 1.05

计算二维等效电导率(T): 286079.25947521866

图 4-63 永磁体等效电导率计算

对于电路的设置，相对来说是最繁琐的。可以先将图 4-37 中的电路图复制，在此基础上进行修改。在修改过程中，尽量少改变原电路中的自由编号顺序，这样 TH2D.xlsx 中的电路信息，大部分可以直接从瞬态场计算的 TS2D.xlsx 中复制得到。如图 4-62 所示。相比于图 4-37 中所示的电路，三相电流源变成了三相电压源，另外增加了 3 个端部漏感。端部漏感在 PWM 谐波损耗的计算中同样相当重要，它决定了 PWM 电压产生的高频交变磁通中，有多少是穿过电机的。

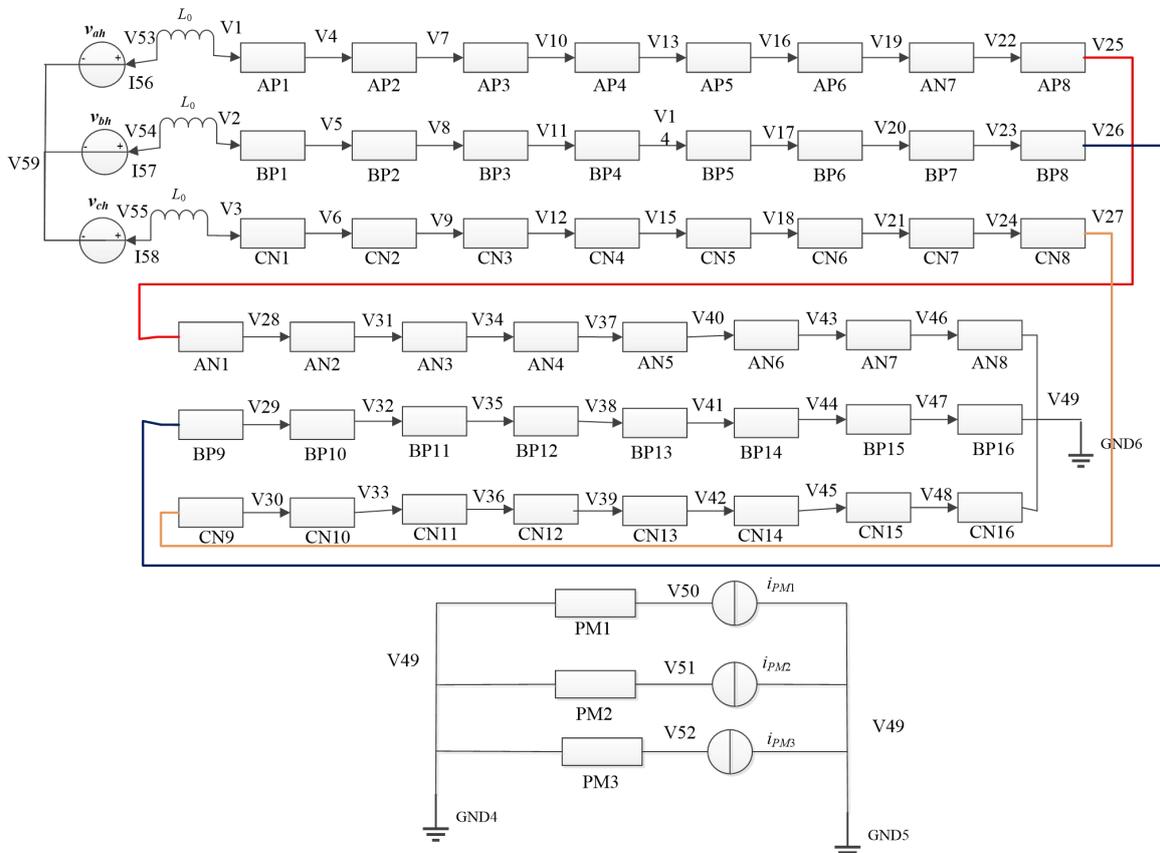


图 4-64 三相正弦电压供电下电路图

在填写 TH2d.xlsx 中数据时，可以同时打开 TS2d.xlsx，从中复制相关数据，并进入

适当修改。例如对于#Lpnode 中的内容，只需在原来基础上增加如图 4-65 所示的自由度即可。而#solid 和#winding\_solid 中的内容则可以完全将 TS2d.xlsx 中对应的内容复制过来，这是因为粗导体关联电路自由度没有任何变化，其余内容详见第 8 章的详解。频域小信号分析的本质就是在不同转子位置、进行不同频率下的时谐场分析，并提取谐波电压与交变磁密、及谐波损耗之间函数关系。可以先将谐波电压都置 0，完整运行一下整个程序，确保时谐场能够正常计算的前提下再进行下面的操作。

53	1	0 Vot
54	1	0 Vot
55	1	0 Vot
56	1	0 Cur
57	1	0 Cur
58	1	0 Cur

图 4-65 三相电压源供电时相比于图 4-37 中三相电流源供电情景增加的自由度

然后再简要介绍一下三相谐波电压快速生成插件。通过 TH2d.xlsx 中的#VS\_input 输入三相谐波电压时需要人为的去计算在不同转子位置输入的谐波电压的实部与虚部，这里增加了一个快速生成不同转子位置  $d$ 、 $q$  轴谐波电压的插件，如图 4-66 所示。在 vdqh\_input.xlsx 中设置  $d$ 、 $q$  轴谐波电压以及每个周期计算点数，设置完毕后关闭 vdqh\_input.xlsx。点击“(2) dq 轴谐波电压转化为 txt”，可根据这个 excel 中的内容自动更新 VS\_input.txt，Position.txt，Time0.txt 的内容。之后即可进行计算。

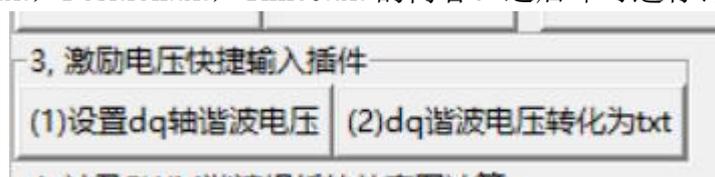


图 4-66 dq 轴高频电压快速输入插件

	A	B	C	D
D轴电压幅值Vdh:		0		
D轴电压相位phidh:		0		
Q轴电压幅值Vqh:		100		
Q轴电压相位phiqh:		0		
初始d轴超前A轴电角度thetai(°):		180		
电机极对数p:		4		
一个周期总点数:		30		
计算总点数:		5		

图 4-67 dq 轴谐波电压快速输入设置

### (2) 不同工作点损耗系数扫描与 PWM 谐波损耗计算

在确保时谐场仿真模型正确建立后，可以开始进行不同工作点的损耗系数扫描，相关按钮如图 4-68 所示。从 TH2d.xlsx 输入参数可以进行任意电机、任意谐波电压输入下的计算。而这个模块则专门是为三相 IPMSM 的方便快捷计算而设计的。

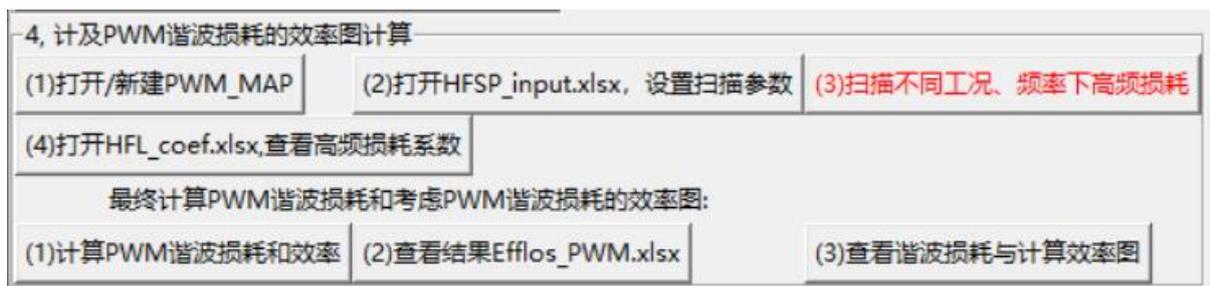


图 4-68 考虑 PWM 谐波损耗的三相 IPMSM 效率图计算模块

首先点击“（1）打开/新建 PWM\_MAP”，如果是第一次操作则会在当前工作路径下新建一个名为 PWM\_MAP 的文件夹。点击“（2）打开 HFSP\_input.xlsx，设置扫描参数”按钮，会弹出如图 4-69 所示的 excel 文件。设置 1/6 电周期内计算步数，是为了考虑损耗系数随转子位置的变化，并求其平均<sup>[9][11]</sup>。ABC 三相电流源在 Cur\_S.txt 在的编号与 idq\_input.xlsx 中的意义相同。这是为了在不同的 d、q 电流激励下，先进行静磁场计算，再进行谐波电压激励下的计算。根据开关频率会设置不同的扫描频率。6 个扫描频率分别设置为： $f_c/2$ ， $f_c$ ， $2f_c$ ， $4f_c$ ， $8f_c$  和  $16f_c$ 。6 个典型工作点的设置则如图 4-70 所示。具体的选取规则在[11]中已经进行了详述，在此不再赘述。此外，HFSP\_input.xlsx 里面最后的三个硅钢片参数是用于简单考虑涡流反应对铁耗系数的影响<sup>[9][11]</sup>。

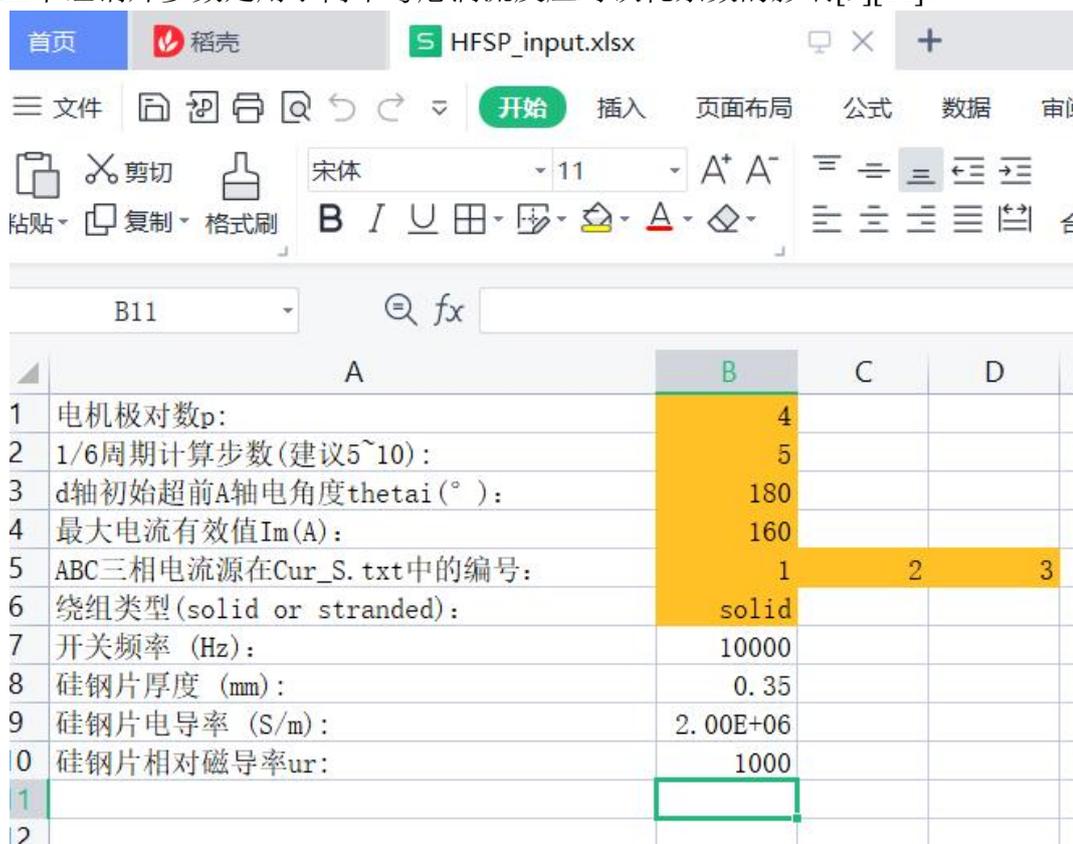


图 4-69 扫描不同工作区设置

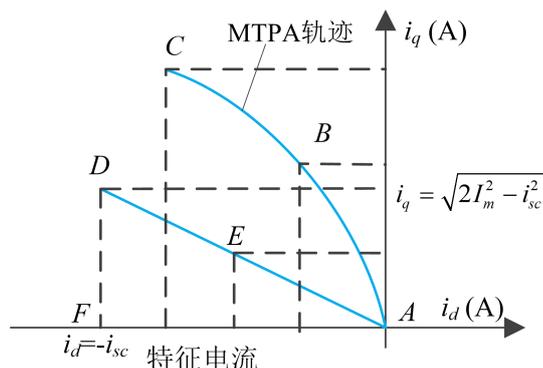


图 4-70 6 个典型工作点选取方式示意图<sup>[11]</sup>

设置好工作 HFSP\_input.xlsx 之后，将其关闭，点击“扫描不同工况、频率下高频损耗”即可开始进行频域小信号分析提取不同工况下的高频损耗系数，软件内部具体的计算流程参见文献[11]。图 4-71 中给出了 100V、不同频率的 d、q 轴谐波电压分别激励下，绕组、定子、转子、永磁体上的谐波损耗。这些数据构成了计算不同工况、不同 PWM 谐波电压激励下永磁电机 PMW 谐波损耗的基础。扫描获取这些系数的时间可能要持续几分钟。

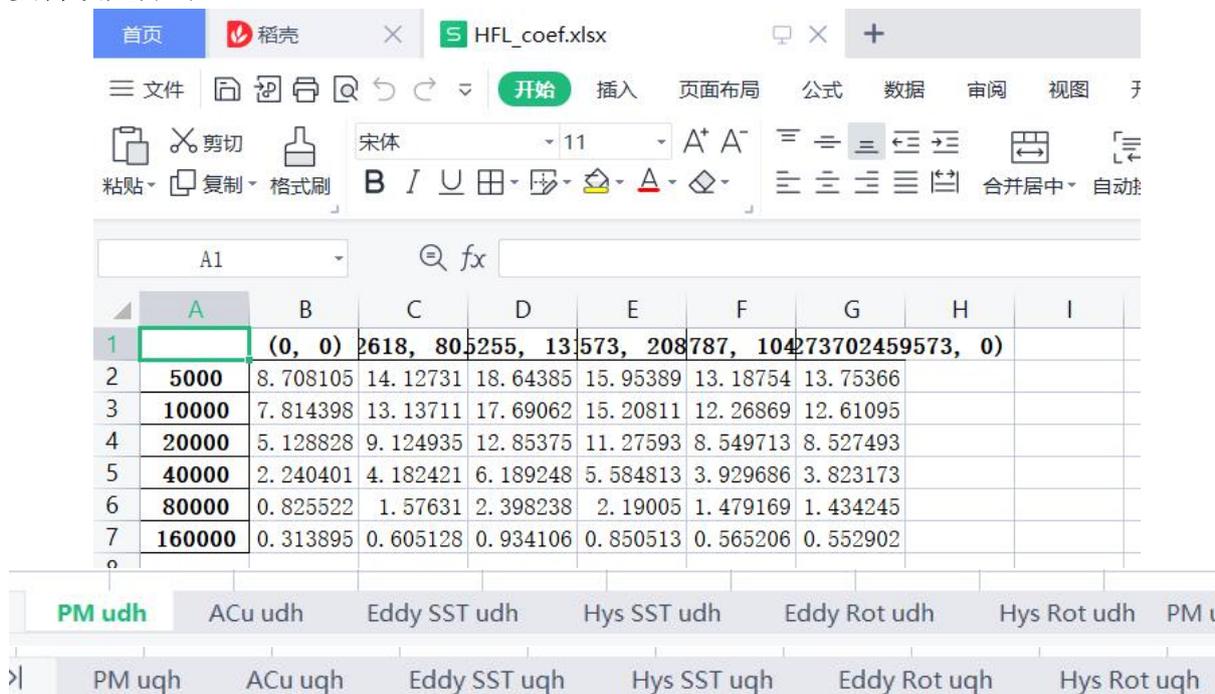


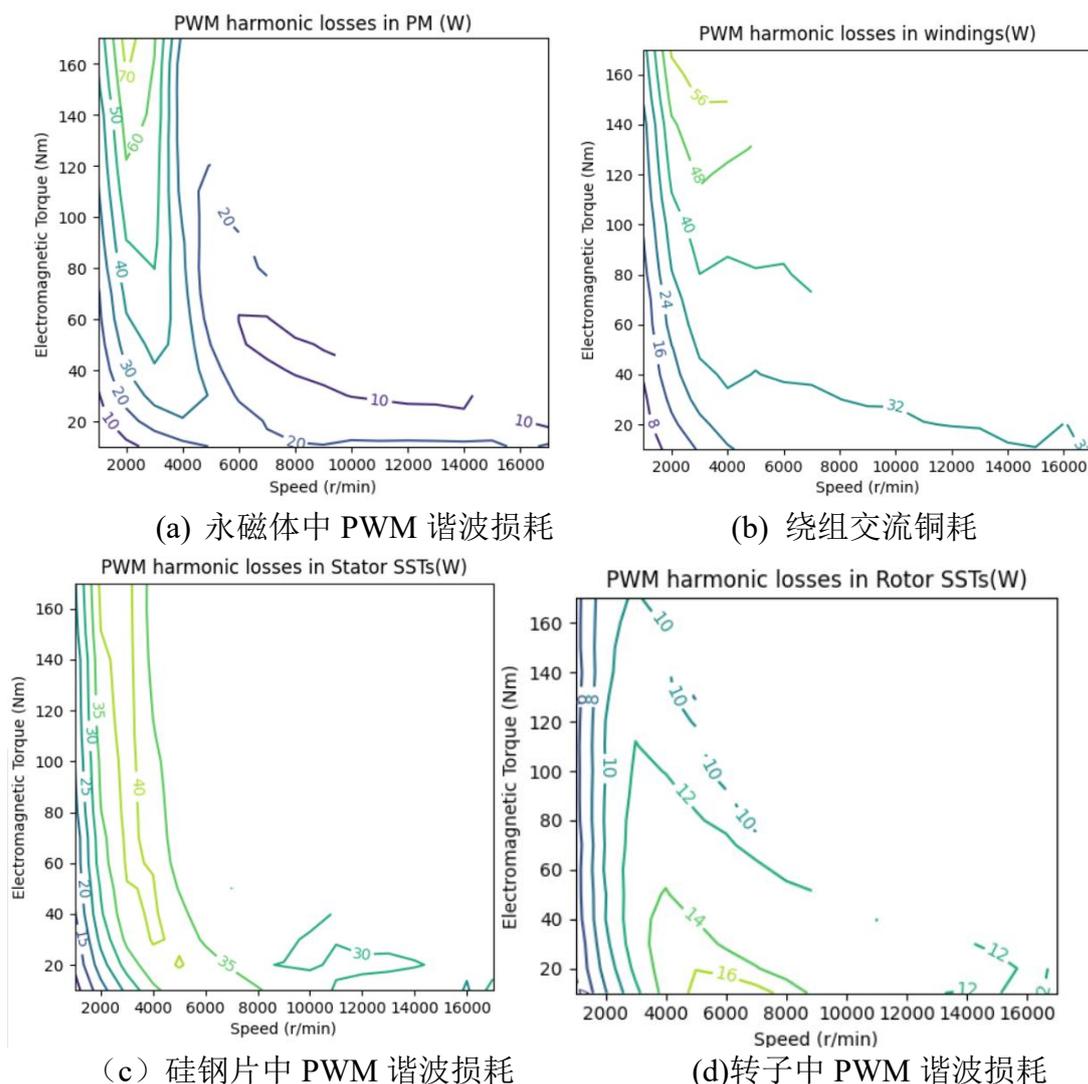
图 4-71 HFL\_coef.xlsx 中主要内容说明

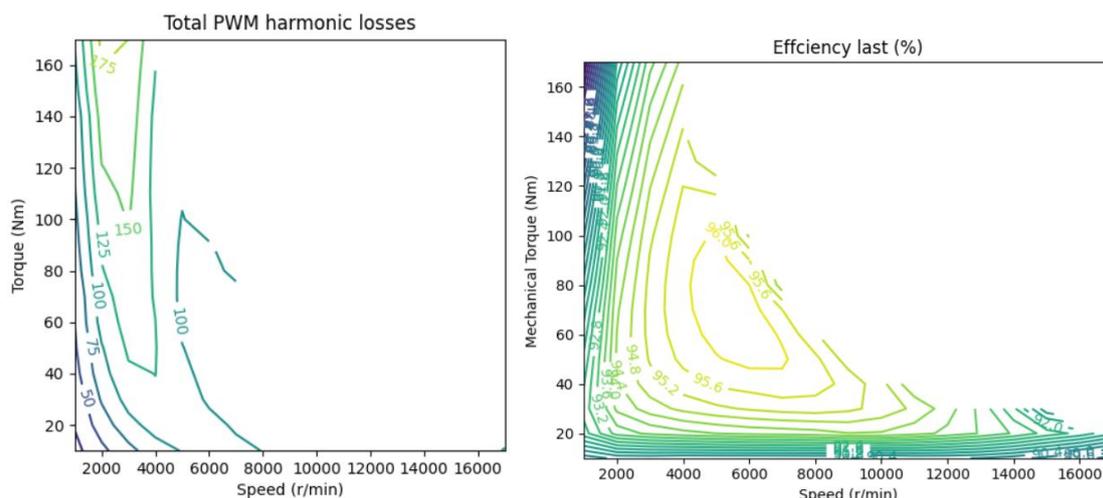
在获取了这些损耗系数之后，即可以开始计算 PWM 谐波损耗和考虑 PWM 谐波损耗情况下的效率图。点击“（1）计算 PWM 谐波损耗效率”的按钮，此时及开始生成每个工作点的 PWM 谐波电压，并以该工作点谐波电压为输入计算 PWM 谐波损耗<sup>[11]</sup>。计算完毕后会弹出 Efflos\_PWM.xlsx 这个 excel 文件，这个文件保存了不同类型的 PWM 谐波损耗及考虑 PWM 谐波损耗时的效率。Eff\_PWM 表示以电磁转矩为纵坐标时的效率，PWM\_PM、PWM\_ACu、PWM\_SST、PWM\_rot 分别指永磁体、铜导条、定子硅钢片、转子硅钢片上的谐波损耗，Tmech\_out 指输出机械转矩、eff\_mech 是指纵坐标为机械转矩时的效率图。此外，在 results 子文件夹下还会对应的存储一个名为 Udc\_Im\_Tend\_Tslot\_PWM\_MAP.xlsx 的文件和 tif 图。



图 4-72 存储 PWM 谐波损耗及考虑 PWM 谐波损耗效率的 Excel 文件

最后点击“（3）查看谐波损耗与计算效率图”可以显示不同类型的 PWM 谐波损耗和考虑 PWM 谐波损耗时的效率图，如图 4-73 所示。可以看出 Prius2017 中的 PWM 谐波还是比较低的，考虑到实际电机中存在切向分段且使用的是 0.25 mm 的硅钢片，实际的 PWM 谐波损耗可能更低。





(e) PWM 谐波总损耗 (d) 考虑 PWM 谐波损耗时效率图

图 4-73 PWM 谐波损耗图及考虑 PWM 谐波损耗的效率图

#### 4.6.5. 近似计算磁滞损耗加速与并行计算加速

之所以在扫描计算时要在扫描计算时计算一个完整的电周期，主要是为了准确计算磁滞损耗，如图 3-32(f)所示。对于三相 IPMSM 而言，若忽略涡流反应只需要进行 1/6 电周期计算即可准确计算平均磁链、转矩等参数。但是考虑到在高速时，槽导体中的 PWM 谐波损耗需要经过一定的时间，才能从 0 上升到稳定。因此需要 1/3 电周期的计算才能准确计算槽导体中的交流铜耗。

基于两点考虑可以对磁滞损耗进行近似计算：（1）磁滞损耗在总损耗或者说是总铁耗中占比不高；（2）设定的磁滞损耗系数本身存在误差。为了快速计算，可以采用涡流损耗近似估算磁滞损耗。即：

$$P_h = P_e \left/ \left( \frac{k_e f \cdot 1.2}{k_h} \right) \right. \quad (4-13)$$

其中， $f$  是进行  $d$ 、 $q$  轴电流扫描时的频率， $P_e$  是各个工作点的平均涡流损耗， $k_e$  和  $k_h$  是涡流和磁滞损耗系数。这里的原理是假设磁密变化波形纯正弦时，硅钢片涡流损耗正比于频率的平方，磁滞损耗只是正比于频率。1.2 是考虑存在谐波时，涡流损耗增加比磁滞损耗明显。

在扫描计算时，勾选“是否用涡流损耗估算磁滞损耗以实现计算速度提升 3 倍”来确定如何计算磁滞损耗。注意如果在扫描阶段已经采用了简化方法，那么每个工作点只计算了 1/3 个电周期，这样在进行工作区状态分析时就不能将这个复选框去掉，否则无法准确计算磁滞损耗。

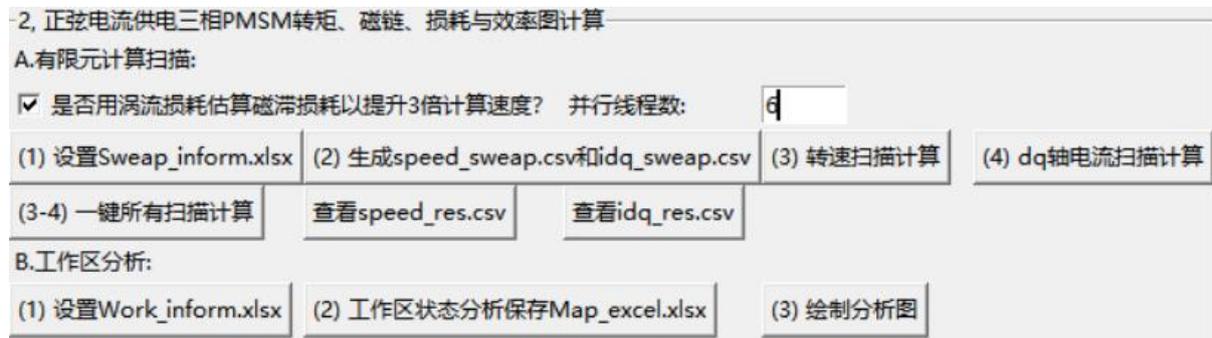
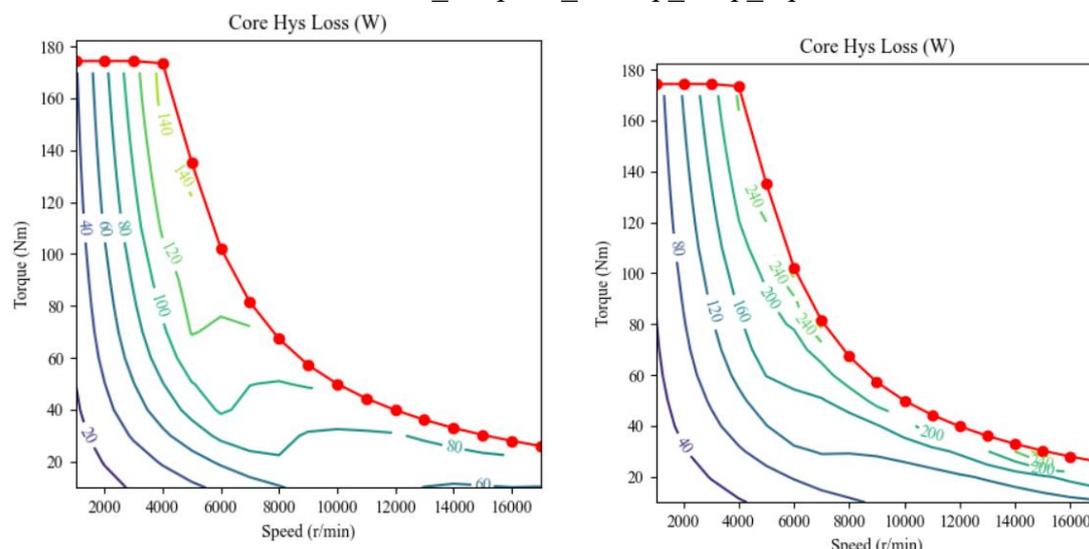


图 4-74 加速设置

此外，为了进行扫描的加速，这里还增加了并行计算功能。将并行线程数设置为 1，

则进行串行计算，而大于 1 则可进行多线程计算。并行加速与磁滞损耗近似计算加速两者可以任选其一，也可以都选择。只进行并行计算不会影响计算精度，而采用涡流损耗估算磁滞损耗则有可能。图 4-75 中给出了两种计算方法对于 Pirus 电机的对比。可以看出近似估算的磁滞损耗比一个完整周期计算的磁滞损耗大，但是基本上不会超过两倍。

相关的一个例子放在了 tutorial\_3.0\prius\_effmap\_simp\_mp 中。



(a) 一个完整电周期计算磁滞损耗

(b) 1/3 电周期估算磁滞损耗

图 4-75 两种方法计算磁滞损耗对比

## 4.7. 变压器供电仿真

### 4.7.1. Gmsh 几何建模

在进行有限元建模时，第一步必然是几何建模。gmsh 可以实现完全参数化建模和网格质量的灵活控制，因此我们直接采用 gmsh 对图 4-1 所示变压器进行绘图，变压器模型参数如表 4 所示。

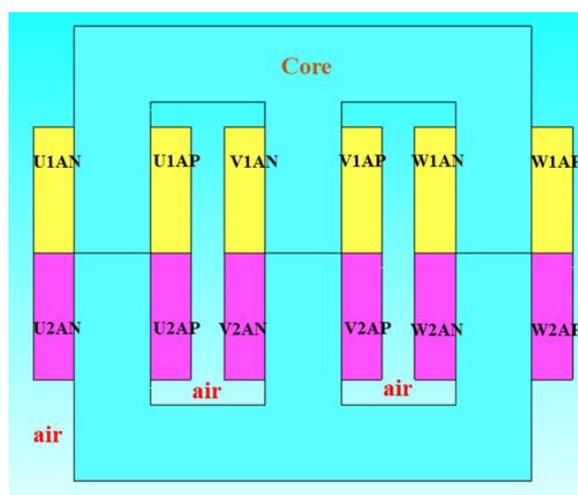


图 4-1

电压	磁链	频率	时间步长	电角度步长
----	----	----	------	-------

220V	0	50Hz	0.5ms	9°
轴向长度	原边绕组匝数	副边绕组匝数	原边单相绕组电阻	副边单相绕组电阻
50mm	200	20	1ohm	0.1ohm
副边电阻	铁芯涡流损耗系数 (W/m <sup>3</sup> /Hz <sup>2</sup> /T <sup>2</sup> )		铁芯磁滞损耗系数 (W/m <sup>3</sup> /Hz/T <sup>2</sup> )	
0.06ohm	0.403		179	

表 4

#### 4.7.1.1. 新建文件

打开 gmsh, 在 gmsh 的界面中点击 file->new 创建新文件, 保存在 test 文件夹中, 命名为 transformer.geo。

#### 4.7.1.2. 定义网格尺寸大小

左侧模块栏, 点击 modules->geometry->edit script, 打开 transformer.geo 脚本文本, 如图 4-2 所示。

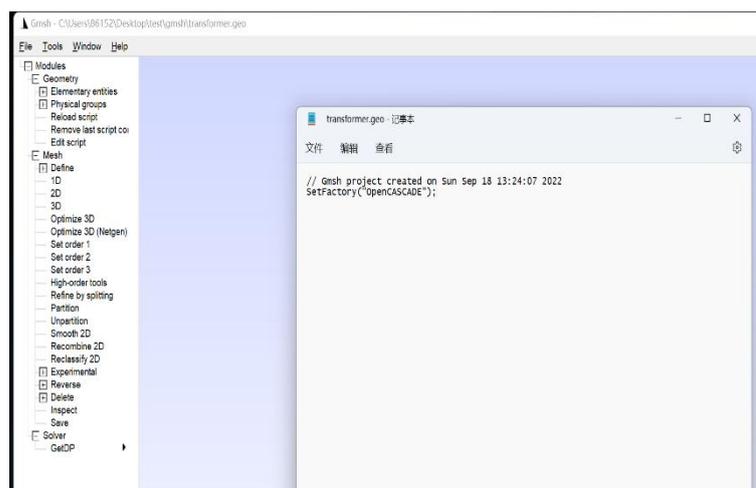


图 4-2

规定网格尺寸大小, 在最后一行后输入 “mesh=10; mesh\_coarse=100;”, 输入后脚本文件如图 4-3 所示。

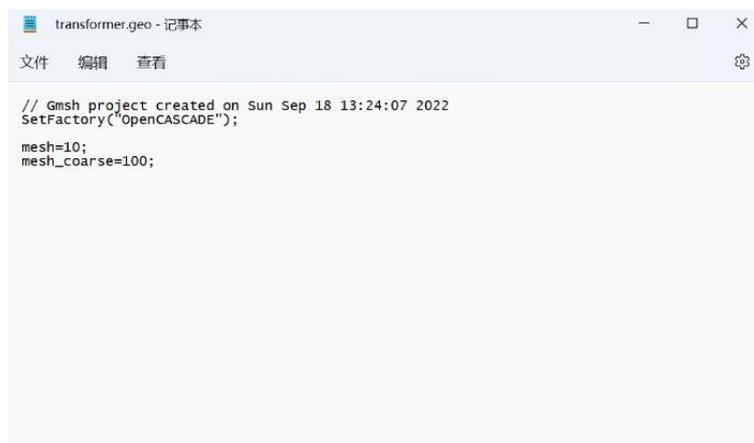


图 4-3

保存并关闭后按小键盘数字 0 重新导入。

#### 4.7.1.3. 根据变压器尺寸，定义变压器模型点

根据变压器的尺寸，确定变压器模型点所在的位置坐标后，从左侧模块栏，点击 modules->geometry->elementary entities->add->point。如图 4-4 所示，X 轴取 225，Y 轴取 225，Z 轴取 0，网格大小设置为“mesh”。

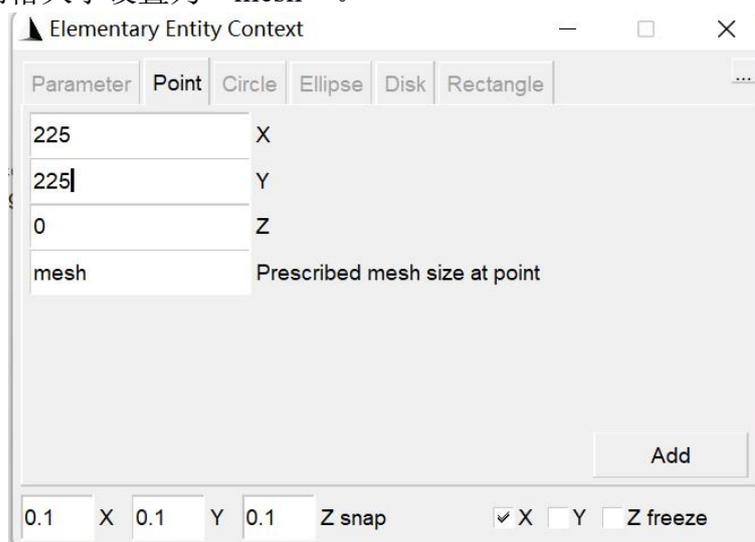


图 4-4

单击 add，就构造成了变压器第一个边界点。同理构造其余三个边界点。此时所构造的点和脚本文件如图 4-5 所示。

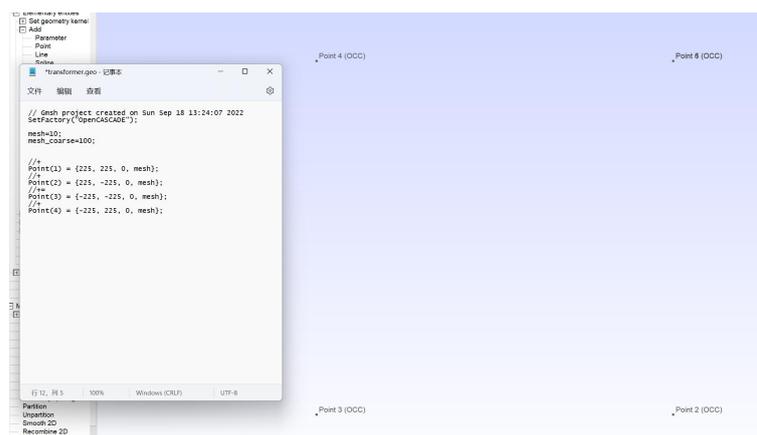


图 4-5

本模型中共有 52 个 point。按照脚本格式书写，定义其余点。保存并关闭后按小键盘数字 0 重新导入，此时构造的点和脚本如图 4-6 所示。至此，变压器模型所有点的位置定义完毕。

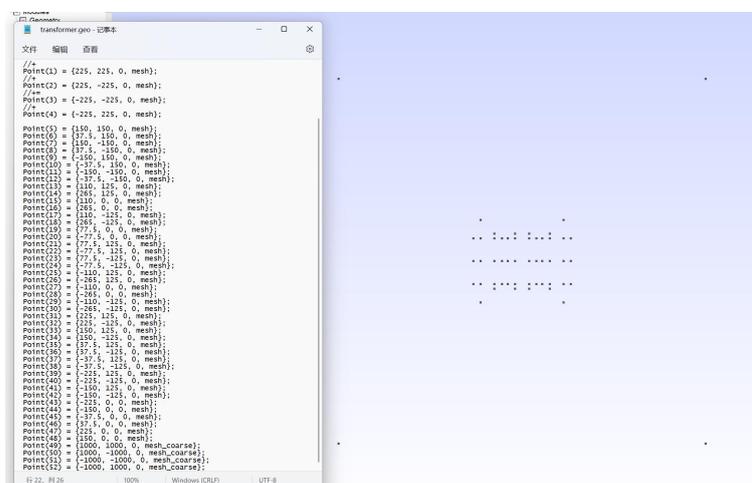


图 4-6

#### 4.7.1.4. 定义变压器模型线

将 1.3 节中定义的变压器模型点连接成线。从左侧模块栏中，点击 modules->geometry->elementary entities->add->line，依次单击要连接成线的 point9、point10，完成对 line 1 的构造。此时模型及脚本如图 4-7 所示。

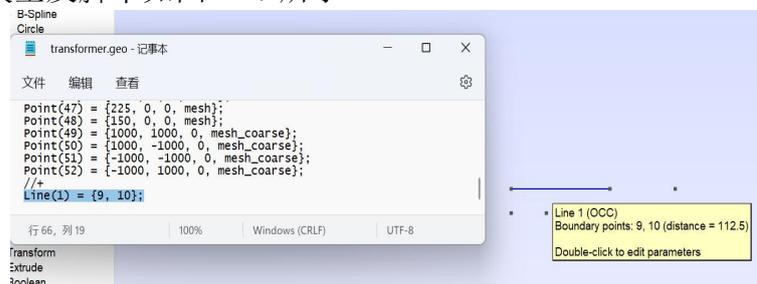


图 4-7

本模型中共有 64 个 line。按照脚本格式书写，定义其余线，保存并关闭后按小键盘数字 0 重新导入。构造的线和脚本如图 4-8 所示。至此，变压器模型所有线定义完毕。

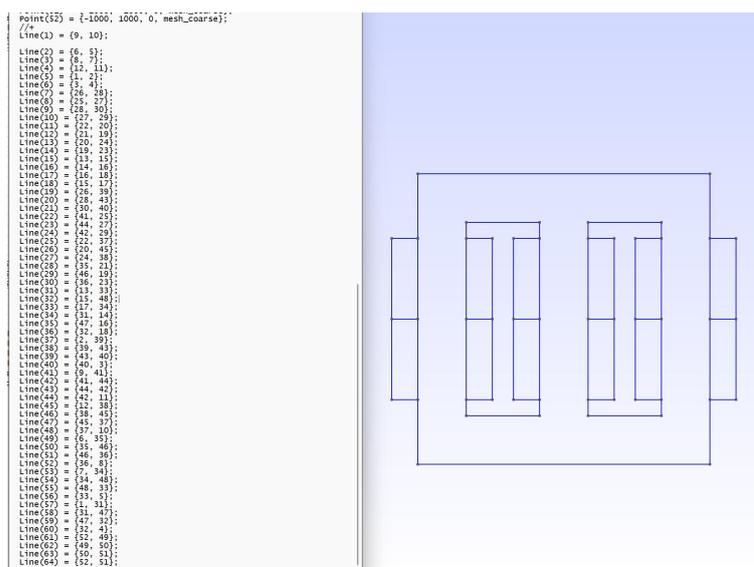


图 4-8

#### 4.7.1.5. 定义变压器模型面

将 1.4 节中定义的变压器模型线组合成面。从左侧模块栏中，点击 modules->geometry->elementary entities->add->plane surface，依次单击围绕 plane1 的边界红色线，如图 4-9 所示。

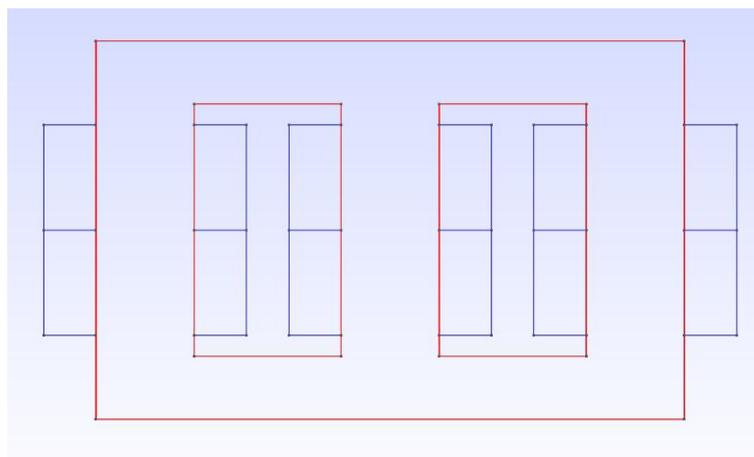


图 4-9

确认后，完成对 plane1 的构造。此时模型及脚本如图 4-10 所示。

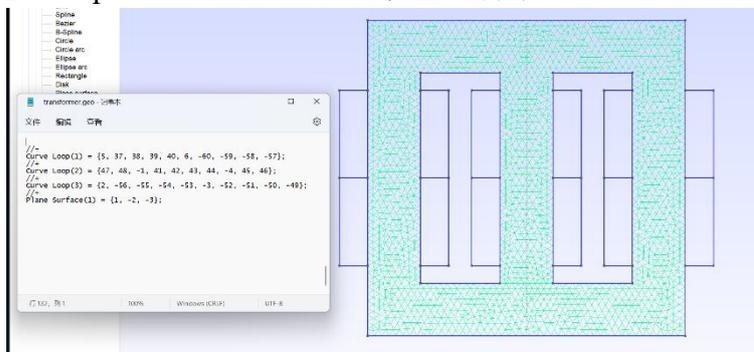


图 4-10

本模型中共有 16 个 plane surface。按照脚本格式书写，定义其余面，保存并关闭后按小键盘数字 0 重新导入。构造的面和脚本如图 4-11 所示。至此，变压器模型所有

定义完毕。

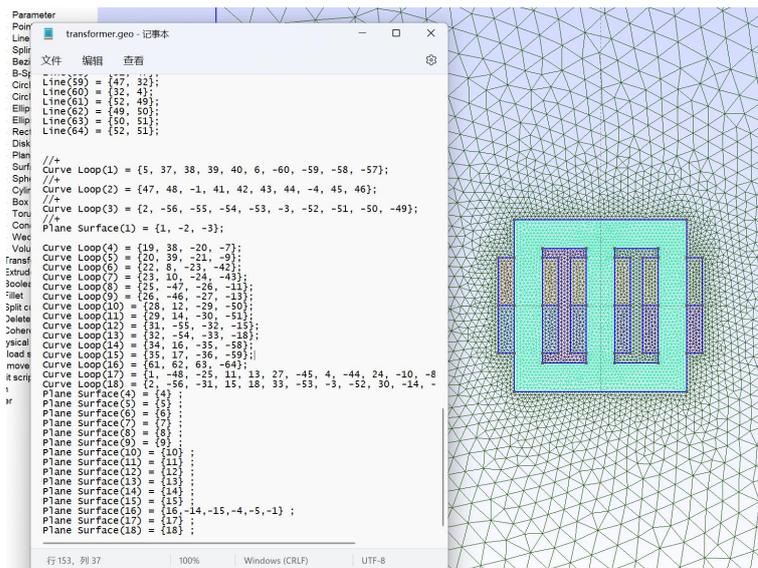


图 4-11

#### 4.7.1.6. Physical region 设置

所谓 physical region 就是将具有相同属性的几何区域组合在一起，这样在有限元模型中对于不同的物理域就可以设置不同的参数。对 1.5 节中定义的面按表 5 定义进行 physical region 设置。

编号	物理区域	物理意义
1	air	空气
2	U1AP	原边 A 相正向绕组
3	U1AN	原边 A 相反向绕组
4	U2AP	副边 A 相正向绕组
5	U2AN	副边 A 相反向绕组
6	V1AP	原边 B 相正向绕组
7	V1AN	原边 B 相反向绕组
8	V2AP	副边 B 相正向绕组
9	V2AN	副边 B 相反向绕组
10	W1AP	原边 C 相正向绕组
11	W1AN	原边 C 相反向绕组
12	W2AP	副边 C 相正向绕组
13	W2AN	副边 C 相反向绕组
14	core	铁芯

表 5

首先定义 air 区域。从左侧模块栏中，点击 modules->geometry->physical region->add->surface，依次选中 1.5 节中定义的 plane16, plane17, plane18，命名为 air，编号 1，

如图 4-12 所示。Physical Surface("air", 1)即表示空气所属的物理区域。

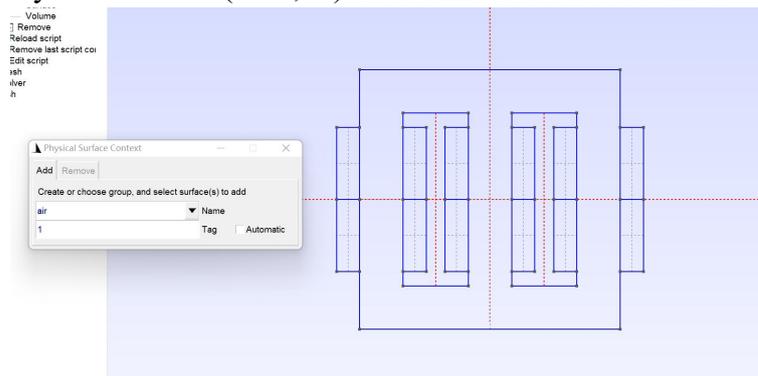


图 4-12

此时脚本如图 4-13 所示。

```
Plane Surface(16) = {16, -14, -15, -4, -5, -1} ;
Plane Surface(17) = {17} ;
Plane Surface(18) = {18} ;
//+
Physical Surface("air", 1) = {16, 17, 18};
```

行 168, 列 23 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8

图 4-13

本模型中共有 14 个 physical region 和 1 个 physical curve (从左侧模块栏中, 点击 modules->geometry->physical region->add->curve)。按照脚本格式书写, 定义其余区域, 保存并关闭后按小键盘数字 0 重新导入。构造的 physical region 及脚本如图 4-14 所示。至此, 变压器模型所有物理区域定义完毕。变压器 Gmsh 模型构建完成, 保存在 transformer.geo 文件中。

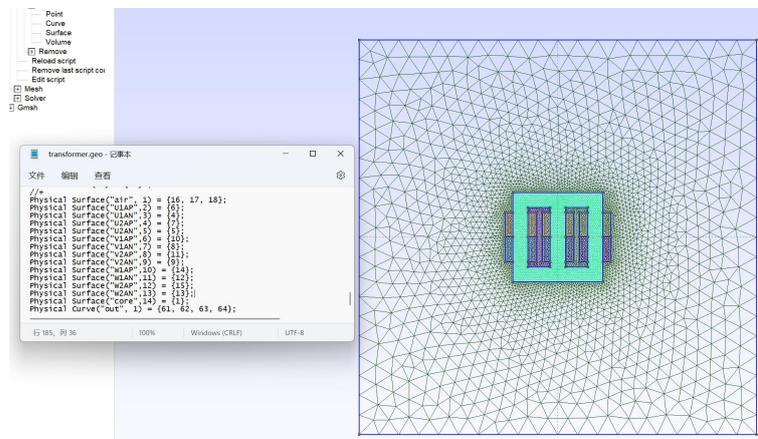


图 4-14

#### 4.7.2. Simag383 初始设置

通过 gmsh 进行几何建模后, 新建一个空文件夹作为工作路径 (workpath), 如本教程中设定 workpath 为 C:/Users/86152/Desktop/transfoermer, 将第一章中 transformer.geo 构建的变压器模型文件复制到 workpath 中。工作路径文件夹如图 4-15 所示。

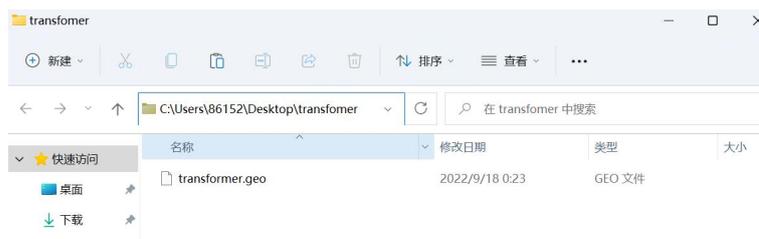


图 4-15

在 Simag383 文件夹中，双击运行 Simag383.exe 打开软件操作界面。然后单击“设置工作目录”按钮，将当前工作路径设置为 C:/Users/86152/Desktop/transformer。选择变压器几何模型，将几何建模与网格剖分处文件改为 transformer.geo 即可。para.geo 不需要进行额外处理，单击下方“打开参数文件”，即可生成默认文件。

设置完成后，单击“查看几何模型”和“生成网格”对变压器模型与区域名称进行核对检验。此时 Simag383 操作界面如图 4-16 所示。

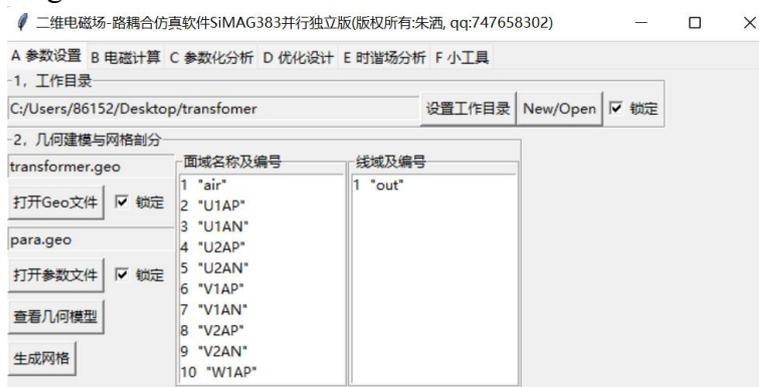


图 4-16

### 4.7.3. 通过 Excel 文件输入模型参数

单击“(1) 初始化 TS2D.xlsx”按钮，自动生成命名为 transformer\_TS2d.xlsx 的 excel 文件。再点击“(2) 打开 TS2D.xlsx”按钮打开 transformer\_TS2d.xlsx，如图 4-17 所示。用户只需要按照约定的规则，在这个文件中的三个工作表 basic parameters、material、circuit 中，分别输入有限元计算所需的所有参数即可。

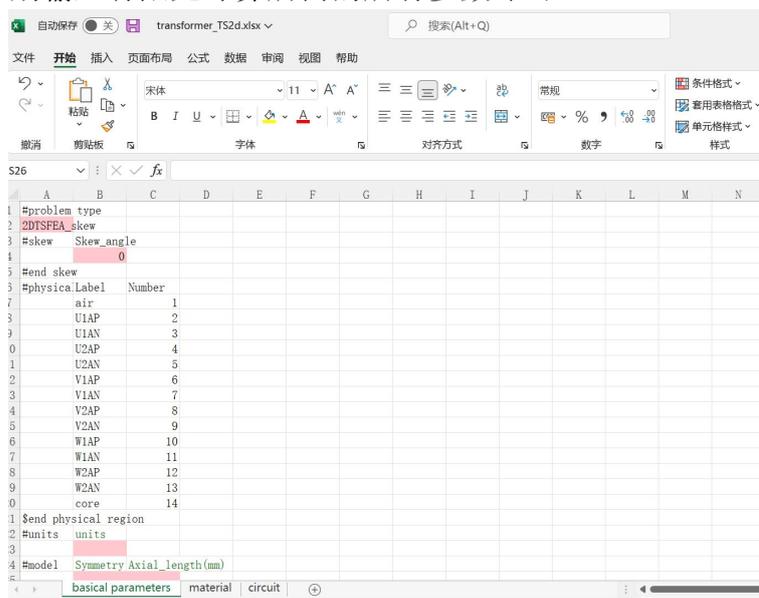


图 4-17

本章仅介绍模拟在三项电压源供电下的变压器所需要对初始 transformer\_TS2d.xlsx 进行修改的部分。

#### 4.7.3.1. basical parameters 设置

##### (1) #units:

units 表示模型的数据单位。对于变压器模型，数据单位设置为 mm。设置完成后如图 4-18 所示。

#units	units
	mm

图 4-18

##### (2) #model:

Symmetry number 表示模型的对称数。变压器是完整模型，无对称，对称数设置为 1。

Axial length(mm) 表示模型轴向长度。根据变压器规定尺寸，轴向长度为 50mm。设置完成后如图 4-19 所示。

#model	Symmetry number	Axial_length(mm)
	2	50

图 4-19

##### (3) #sidelink:

此项表示 sidelink 主从边界设置。对于此变压器模型，不需要设置边界。Isexist? 设置为 No。Master angle(°)、Slave angle(°) 设置默认值 0，Linktype 设置默认值 1。

设置完成后如图 4-20 所示。

#sidelink	Isexist?	Master angle(°)	Slave angle(°)	Linktype
	No	0	0	1

图 4-20

##### (4) #Ini\_pos、#gap mesh、#torque region:

三项分别表示电机转子初始角度、电机气隙网格剖分、电机转矩计算，是模拟电机模型所需的基本参数。而对于变压器模型则不需要设置，因此将这三项待输入的部分删除。

删除后如图 4-21 所示。

#Ini_pos	Rotor initial mechanical position(°)	
#gap mesh	Mesh number	Total mechanical angle
#torque region	Region Labels:...	

图 4-21

##### (5) #isrotation:

此项表示转子旋转与转子永磁体参数。对于变压器模型，不存在转子旋转。将 #Is rotation? 设置为 No，并将永磁体 PM 待输入部分删除。

设置完成后如图 4-22 所示。

#isrotation	#Is rotation?			
	No			
\$rotor PM	Pyhsical Region	Magnetization angle(°)	Br(T)	ur
\$end rotor PM				

图 4-22

##### (6) #Time0、#Position:

这两项分别表示模拟的时间与步数。本例中计划模拟 200ms，400 步。

Start Time(ms)、Start Position(°)为初始时间和位置，均默认为 0 不用修改。

Position step(°)表示每一步电角度变化，根据本例参数规定设置为 9°。

Total step number表示模拟总步数，设置为 400 步。

Time step(ms)表示每一步的时长，共 200ms，400 步，设置为 200/400=0.5ms。

End Time(ms)表示结束时间，每步 0.5ms，共 400 步，从 0 开始为第一步，所以此处设置为 0.5\*399=199.5ms。

设置后如图 4-23 所示。

#Time0	Start Time(ms)	End Time(ms)	Time step(ms)
	0	199.5	0.5
#Position	Start Position(°)	Position step(°)	Total step number
	0	9	400

图 4-23

#### (7) #Bregion、#fdvregion:

这两项分别表示磁密与磁导率的参数保存类型和位置，默认设置为 type2 和 type1。

设置完成后如图 4-24 所示。

#Bregion	Coordinate type(1: Region Labels...
	2
#fdvregion	type (1: FDRTM; 2: Region Labels...
	1

图 4-24

#### 4.7.3.2. material 设置

##### (1) #BH\_curves:

此项表示变压器中可能用到的硅钢片材料的磁化曲线。

Label表示硅钢片材料名称，我们选取 50DW470 型硅钢片。

Magnetic field H(A/m)表示 磁场强度，Flux density B(T)表示磁感应强度，参考相关输入选取 50DW470 的磁化曲线数据。

设置完成后如图 4-25 所示。

#BH_curves	Label	Magnetic field	Flux density
\$BH	50DW470	H(A/m)	B(T)
		0	0
		58	0.4
		60	0.45
		62	0.5
		64	0.55
		68	0.6
		72	0.65
		75	0.7
		78	0.75
		84	0.8
		92	0.85
		100	0.9
		107	0.95
		116	1
		127	1.05
		143	1.1
		167	1.15
		197	1.2
		239	1.25
		303	1.3
		422	1.35
		597	1.4
		955	1.45
		1592	1.5
		2389	1.55
		3462	1.6
		5096	1.65
		6529	1.7
		8262	1.75
		10988	1.8
		14730	1.85
		18313	1.9
		23090	1.95
		30892	2
		47771	2.05
		74045	2.1
\$end BH			
#end BH_curves			

图 4-25

**(2) #material:**

此项设置 1.6 节中通过 gmsh 设置的不同部分 physical region 的材料及参数。

Relative permeability 表示不同区域的相对磁导率。对于空气和绕组导线部分，我们设置相对磁导率为 1。对于变压器铁芯相对磁导率我们选取非线性材料硅钢片 50DW470 参数。

Current density (A/m<sup>2</sup>)表示外加激励电流的密度。本例通过场耦合模拟变压器运行，不需要额外加入电流，全部默认为 0。

Br(T)表示剩磁。全部默认剩磁为 0。

Magnetization angle (°)表示磁化角度。全部默认为 0。

Conductivity (S/m)表示电导率。空气电导率为 0。绕组区域虽然是铜导线，但是作为细导线区域，电导率设置为 0。变压器中的绕组都是绝缘的，所以也不会导电给铁芯，铁芯电导率设置为 0。

设置完成后如图 4-26 所示。

#material	Region Label	Relative permeability	Current density (A/m <sup>2</sup> )	Br(T)	Magnetization angle (°)	Conductivity (S/m)
air		1	0	0	0	0
U1AP		1	0	0	0	0
U1AN		1	0	0	0	0
U2AP		1	0	0	0	0
U2AN		1	0	0	0	0
V1AP		1	0	0	0	0
V1AN		1	0	0	0	0
V2AP		1	0	0	0	0
V2AN		1	0	0	0	0
W1AP		1	0	0	0	0
W1AN		1	0	0	0	0
W2AP		1	0	0	0	0
W2AN		1	0	0 <td 0	0	
core	50DW470		0	0	0	0
#end material						

图 4-26

### (3) #coef\_iron:

此项根据变压器材料设置变压器内铁耗区域（铁芯）的铁耗系数。

Region Label表示铁耗区域。变压器内只有铁芯是铁耗区域，设置为 core。

Eddy current loss coefficients(W/m<sup>3</sup>/Hz<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>)表示涡流损耗系数。根据本例参数规定设置为 0.403。

Hysteresis loss coefficients(W/m<sup>3</sup>/Hz/T<sup>2</sup>)表示磁滞损耗系数。根据本例参数规定设置为 179。

设置完成后如图 4-27 所示。

#coef_iron	Region Label	Eddy current loss coefficients(W/m <sup>3</sup> /Hz <sup>2</sup> /T <sup>2</sup> )	Hysteresis loss coefficients(W/m <sup>3</sup> /Hz/T <sup>2</sup> )
core		0.403	179
#end coef_iron			

图 4-27

### 4.7.3.3. circuit 设置

#### (1) #Lpnode:

此项根据变压器等效电路图，如图 4-28，输入变压器原副边电路的自由度信息。

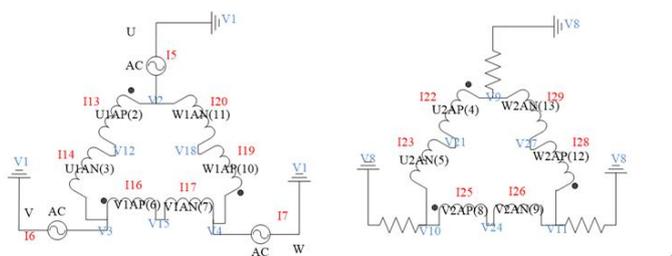


图 4-28

Node number表示自由度编号。电路共有 29 个自由度，分别编号 1~29。

Id0表示自由度规格数。节点 1 和节点 8 为接地节点，为已知自由度，设置为-1。其余节点为未知待求自由度，设置为 1。

Disp0 表示已知自由度的给定值。节点 1 和节点 8 为接地节点，因此给定值为 0。其余节点为未知待求自由度，全部默认设置为 0。

Type 表示自由类型。根据图 3.3 等效电路图，节点 1、2、3、4、8、9、10、11、12、15、18、21、24、27 为电压节点，设置为 Vot。节点 5、6、7、13、14、16、17、19、20、22、23、25、26、28、29 为电流节点，设置为 Cur。

设置完成后如图 4-29 所示。

#Lpnode	Node number	Id0	Disp0	Type
	1	-1	0	Vot
	2	1	0	Vot
	3	1	0	Vot
	4	1	0	Vot
	5	1	0	Cur
	6	1	0	Cur
	7	1	0	Cur
	8	-1	0	Vot
	9	1	0	Vot
	10	1	0	Vot
	11	1	0	Vot
	12	1	0	Vot
	13	1	0	Cur
	14	1	0	Cur
	15	1	0	Vot
	16	1	0	Cur
	17	1	0	Cur
	18	1	0	Vot
	19	1	0	Cur
	20	1	0	Cur
	21	1	0	Vot
	22	1	0	Cur
	23	1	0	Cur
	24	1	0	Vot
	25	1	0	Cur
	26	1	0	Cur
	27	1	0	Vot
	28	1	0	Cur
	29	1	0	Cur
#end Lpnode				

图 4-29

**(2) #strand:**

此项设置细导线单元（不考虑涡流反应的绕组区域）的接线方式。

physical region 表示 1.6 节中所设置的 physical region 的绕组名称。本例中设置为 U1AP、U1AN、U2AP、U2AN、V1AP、V1AN、V2AP、V2AN、W1AP、W1AN、W2AP、W2AN 共 12 个绕组区域。

V1、V2、I12 表示根据电路图对应于 3.3 节 #Lpnode 中相应的自由度编号。以原边 A 相正向绕组 U1AP 为例，根据等效电路图，U1AP 连接了 2 号电压节点和 12 号电压节点，绕组电流大小为 13 号电流节点。所以此处设置 V1 为 2，V2 为 12，I12 为 13。

Direction 表示电流在有限元区域中的方向，1 表示流出纸面方向，-1 表示流入纸面

方向。此处所有正相绕组 U1AP、U2AP、V1AP、V2AP、W1AP、W2AP 电流为流出纸面方向，设置为 1。所有反向绕组 U1AN、U2AN、V1AN、V2AN、W1AN、W2AN 电流为流入纸面方向，设置为-1。

**Belong Winding** 表示 strand 细导线单元的所属绕组。U1AP、U1AN 对应原边 A 相绕组 windA1。U2AP、U2AN 对应副边 A 相绕组 windA2。V1AP、V1AN 对应原边 B 相绕组 windB1。V2AP、V2AN 对应副边 B 相绕组 windB2。W1AP、W1AN 对应原边 C 相绕组 windC1。W2AP、W2AN 对应副边 C 相绕组 windC2。

设置完成后如图 4-30 所示。

#strand	physical region	V1	V2	I12	direction	Belong Winding
	U1AP	2	12	13	1	windA1
	U1AN	12	3	14	-1	windA1
	U2AP	9	21	22	1	windA2
	U2AN	21	10	23	-1	windA2
	V1AP	3	15	16	1	windB1
	V1AN	15	4	17	-1	windB1
	V2AP	10	24	25	1	windB2
	V2AN	24	11	26	-1	windB2
	W1AP	4	18	19	1	windC1
	W1AN	18	2	20	-1	windC1
	W2AP	11	27	28	1	windC2
	W2AN	27	9	29	-1	windC2
#end strand						

图 4-30

### (3) #winding\_stranded:

此项设置绕线式绕组分布情况。

**Winding name** 表示绕组名称。本例针对三相变压器模型分为原边 A 相绕组 windA1、原边 B 相绕组 windB1、原边 C 相绕组 windC1、副边 A 相绕组 windA2、副边 B 相绕组 windB2、副边 C 相绕组 windC2。

**Total turns** 表示各绕组总匝数。根据变压器基本参数规定，变压器原边单相绕组 windA1、windB1、windC1 总匝数设置为 200，变压器副边单相绕组 windA2、windB2、windC2 总匝数设置为 20。

**Phase resistance** 表示绕组相电阻。根据变压器基本参数规定，变压器原边单相绕组 windA1、windB1、windC1 电阻设置为 1Ω，变压器副边单相绕组 windA2、windB2、windC2 电阻设置为 0.1Ω。

**Parallel number** 表示绕组并联支路数。本例变压器绕组无并联支路，并联支路数均设置为 1。

**Initial current** 表示绕组初始电流。本例采用三项电压源供电，暂时不设置初始电流激励，默认为 0。

设置完成后如图 4-31 所示。

#winding_stranded	Winding name	Total turns	Phase resistance	Parallel number	Initial current
	windA1	200	1	1	0
	windB1	200	1	1	0
	windC1	200	1	1	0
	windA2	20	0.1	1	0
	windB2	20	0.1	1	0
	windC2	20	0.1	1	0
#end winding_stranded					

图 4-31

**(4) #solid、#winding\_solid:**

这两项分别设置粗导体单元（考虑内部涡流反应的导体单元）的接线方式和分布情况。因为此例变压器模型不考虑内部涡流反应，不设置粗导体单元，因此将两项待输入的部分删除。

删除后如图 4-32 所示。

#solid	physical region	V1	V2	direction	Belong Winding
#end solid					
#winding_solid	Winding name	Initial current	Parallel number		
#end winding_solid					

图 4-32

**(5) #Res:**

此项设置电路中的电阻。对于本例中的变压器模型，除了 3.3#winding\_stranded 中设置的绕组电阻，变压器副边处仍有额外电阻。根据电路图，在副边电压节点 9、10、11 与接地节点 8 连接处分别设置一个副边电阻。

V1、V2 表示两节点的自由度编号。分别输入 8 和 9，8 和 10，8 和 11。

Res (Ω) 表示电阻阻值。根据变压器参数规定，副边电阻大小均设置为 0.06。

设置完成后如图 4-33 所示。

#Res	V1	V2	Res (Ω)
	8	9	0.06
	8	10	0.06
	8	11	0.06
#end Res			

图 4-33

**(6) #Leak:**

此项设置电路中的电感。对于本例中的变压器模型，不设置额外电感，因此将待输入的部分删除。

删除后如图 4-34 所示。

#Leak	V1	V2	I12	Inductance (H)	Initial current (A)
#end Leak					

图 4-34

**(7) #Cur\_S、#CS\_input**

这两项设置电路中供电的电流源参数。对于本例中的变压器模型，不采用电流源供电，因此将待输入的部分删除。

删除后如图 4-35 和图 4-36 所示。

#Cur_S	name	V1	V2	Current (A)
#end Cur_S				

图 4-35

#CS_input	Total steps:	Label...
#end CS_input		

图 4-36

**(8) #Vot\_S:**

此项设置电压源对应电路中的编号。

Name 表示 ABC 三相电压源名称。分别命名为 Va、Vb、Vc。

V1、V2、I12 分别表示电压源位置对应电路中的关联自由度编号。根据等效电路图，电压源位于原边电压节点 2、3、4 和接地节点 1 连接处，连接处电流自由度编号为 5、6、7。

Voltage (V) 表示电压源初始输入电压。均默认设置为 0。

设置完成后如图 4-37 所示。

#Vot_S	name	V1	V2	I12	Voltage (V)
	Va	2	1	5	0
	Vb	3	1	6	0
	Vc	4	1	7	0
#end Vot_S					

图 4-37

**(9) #VS\_input:**

此项设置电压源随时间变化，用于更新每步电压源的值。

Total steps 表示电压源变化的总步数。本例中模拟变压器在电压源供电 400 步的变化。

Label 表示电压源名称。在 Label 下方设置三相电压源 Va、Vb、Vc 及电压源随时间变化的值，此处直接采用已经设置好的 10 个周期的三相电压源供电电压。

设置完成后如图 4-38 所示。（400 步电压源太过冗长，仅展示部分）

#VS_input	Total steps:	Label...		
	400	Va	Vb	Vc
	1	0	0	0
	2	34.4155823	170.972112	-205.38769
	3	67.9837388	147.208733	-215.19247
	4	99.8779099	119.820588	-219.6985
	5	129.312756	89.4820615	-218.79482
	6	155.563492	56.9401899	-212.50368
	7	177.983739	22.9962619	-200.98
	8	196.021435	-11.51391	-184.50752
	9	209.232434	-45.740572	-163.49186
	10	217.291435	-78.840949	-138.45049
	...	...	...	...
	...	...	...	...
	388	-196.02144	11.5139104	184.507525
	389	-209.23243	45.740572	163.491862
	390	-217.29143	78.8409489	138.450486
	391	-220	110	110
	392	-217.29143	138.450486	78.8409489
	393	-209.23243	163.491862	45.740572
	394	-196.02144	184.507525	11.5139104
	395	-177.98374	200.980001	-22.996262
	396	-155.56349	212.503682	-56.94019
	397	-129.31276	218.794817	-89.482061
	398	-99.87791	219.698498	-119.82059
	399	-67.983739	215.192472	-147.20873
	400	-34.415582	205.387694	-170.97211
#end VS_input				

图 4-38

至此，transformer\_TS2d.xlsx 所有参数设置完成，保存并关闭 transformer\_TS2d.xlsx。此时，工作路径文件夹共有 4 个文件，如图 4-39 所示。

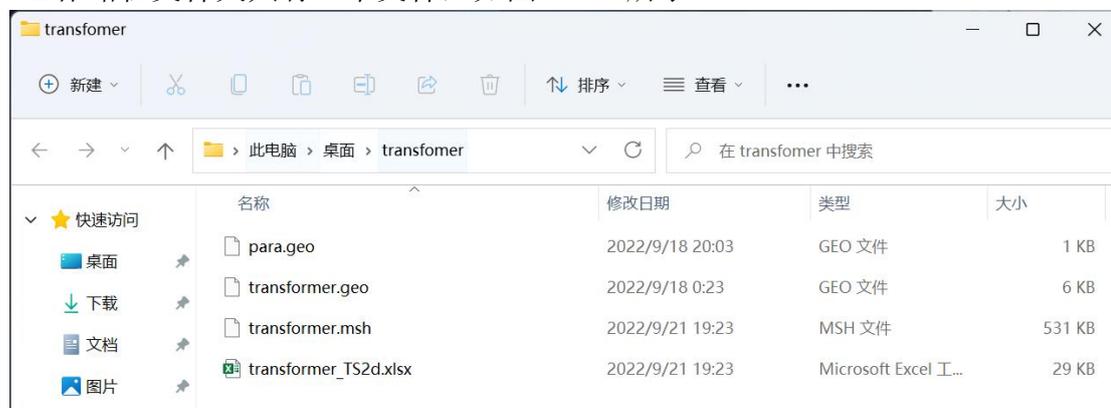


图 4-39

接下来，在 Simag383 操作界面单击“(3) 读取 TS2D.xlsx 转化为 txt 格式”按钮，本章设置好的 transformer\_TS2d.xlsx 文件会根据输入信息自动生成对应 txt 文件。这时候再打开当前工作路径文件夹，会发现多出了 26 个 txt 文件，如图 4-40 所示。程序最后运行读取的也是最终工作路径文件夹里的 txt 文件。



图 4-40

#### 4.7.4. 有限元计算

通过 Simag383 软件设置参数后，接下来就可以进行有限元电磁计算。

##### 4.7.4.1. 初始化

在 Simag383 软件最上面目录栏中单击 **B** 电磁计算，会切换到软件的电磁计算功能。在有限元计算中单击“（1）初始化”按钮，在控制台上会看到节点数，三角单元总数等，如图 4-41 所示。

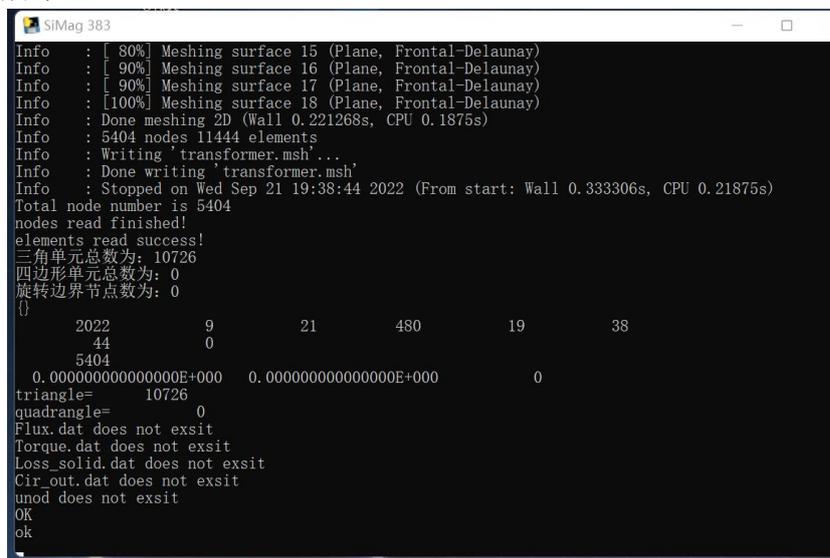


图 4-41

此时工作路径文件夹中，又多出了 14 个无后缀文件。如图 4-42 所示。

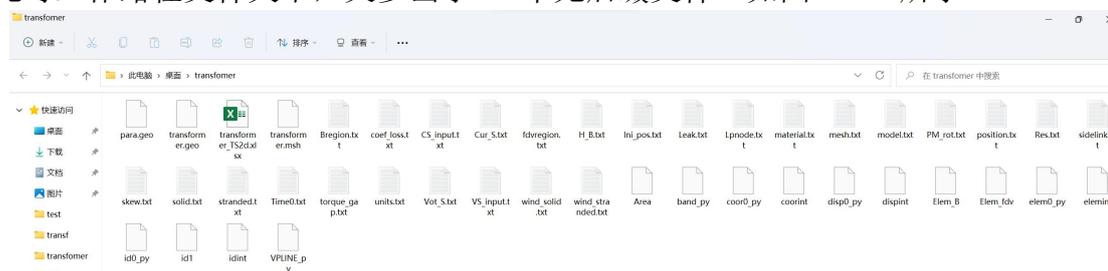


图 4-42

##### 4.7.4.2. 进行有限元计算

当初始化没有任何错误时，可以继续点击“（2）开始计算”进行核心计算。如果程序没有错误，对于本变压器模型案例，计算将在 2min34s 后完成。控制台结果如图 4-43 所示。

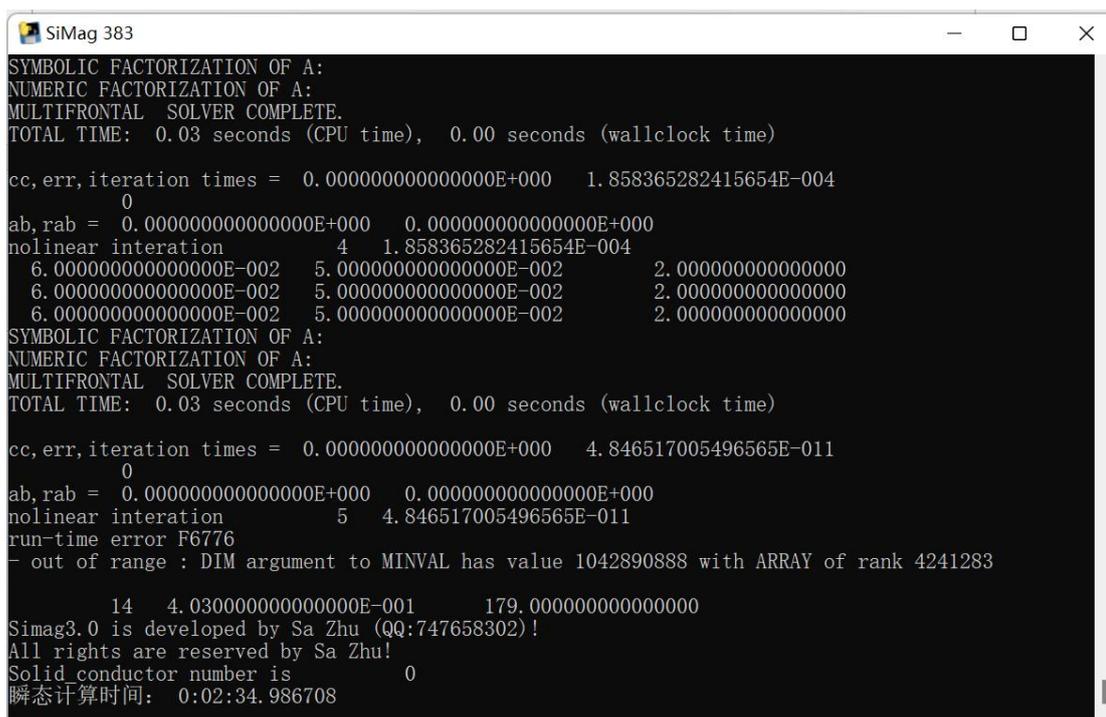


图 4-43

计算完成后在工作路径文件夹中会多出一些文件，主要的结果文件如图 4-44 所示。

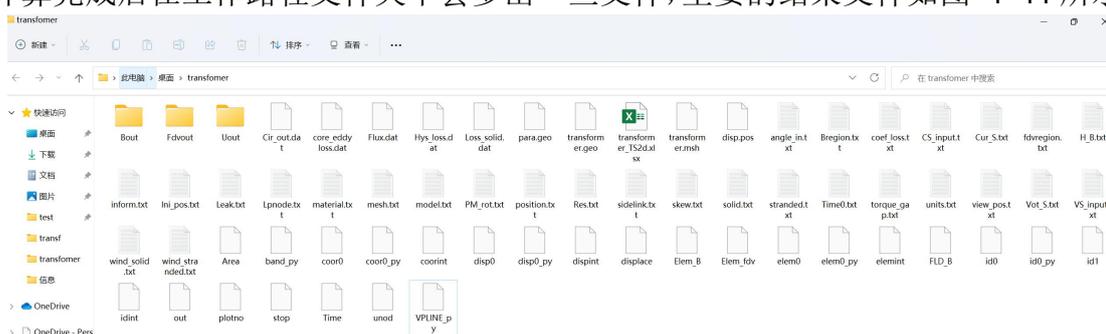


图 4-44

#### 4.7.5. 仿真结果分析

当计算完毕之后，拖动进度条选择需要查看磁力线和磁密的位置，点击“(3) 结果显示”。可以看到第 201 步的磁力线和磁密分布如图 4-45 和图 4-46 所示。

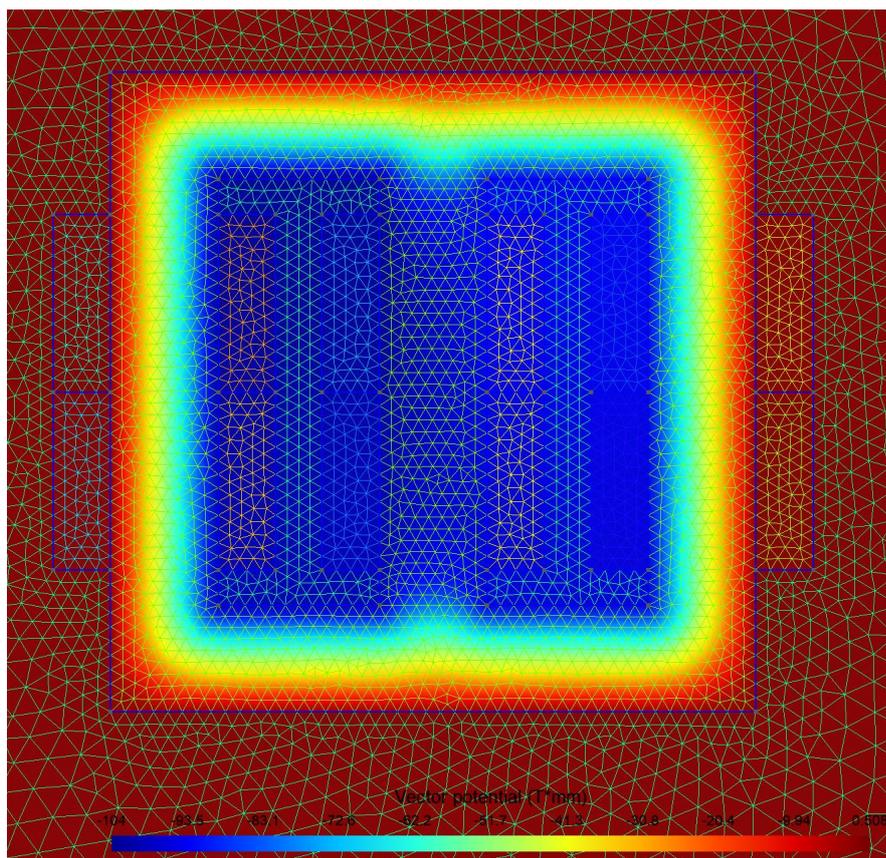


图 4-45 第 201 步 (1800° ) 磁力线图 (Gmsh)

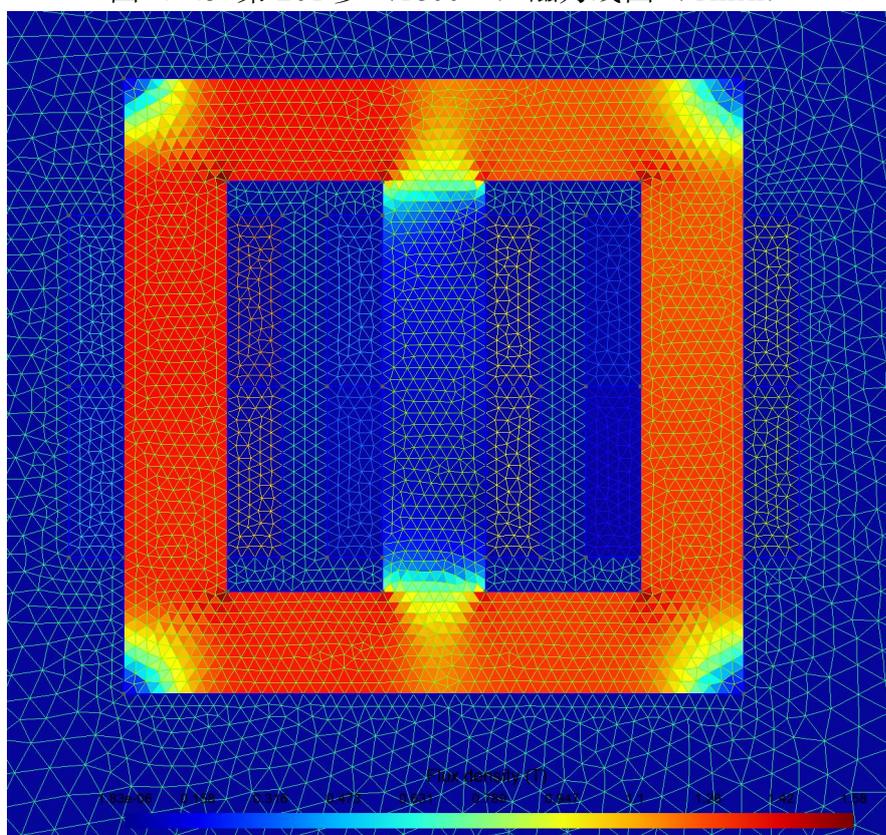


图 4-46 第 201 步 (1800° ) 磁感应强度图 (Gmsh)

点击后处理的“显示电压电流”按钮，可以输出电压电流计算结果。通过 excel 可画图出变压器等效电路对应节点的电压电流图，如图 4-47 和图 4-48 所示。

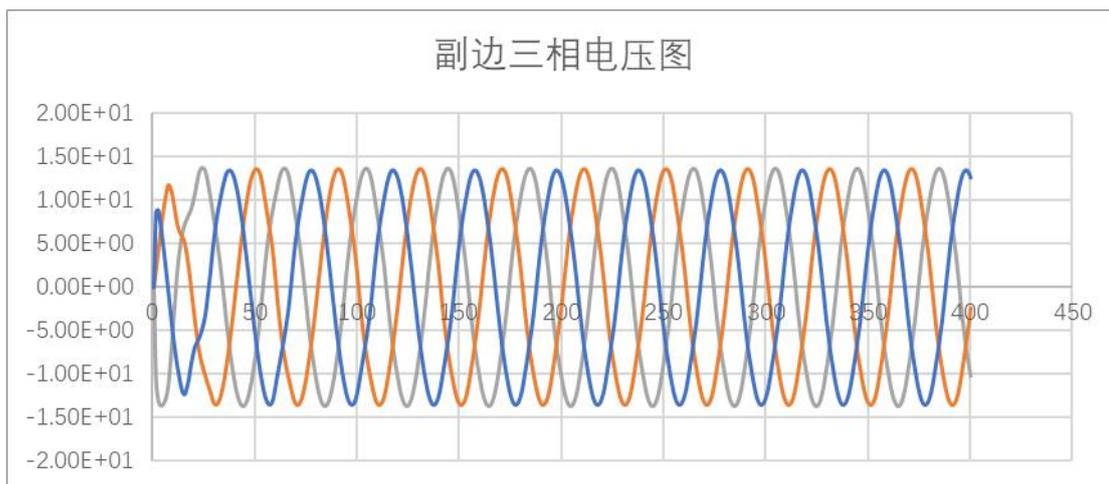


图 4-47 副边三相电压图 (SiMag383)

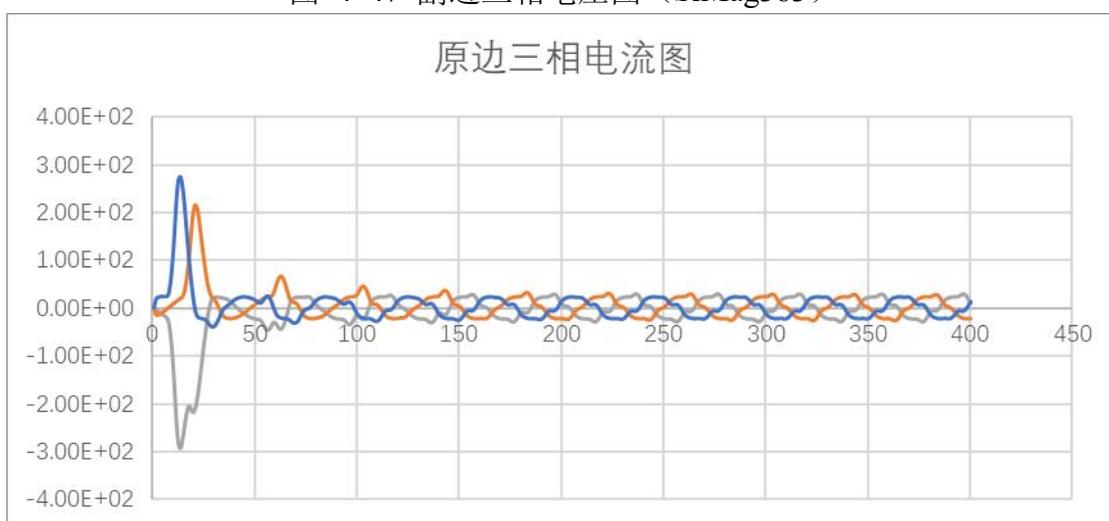
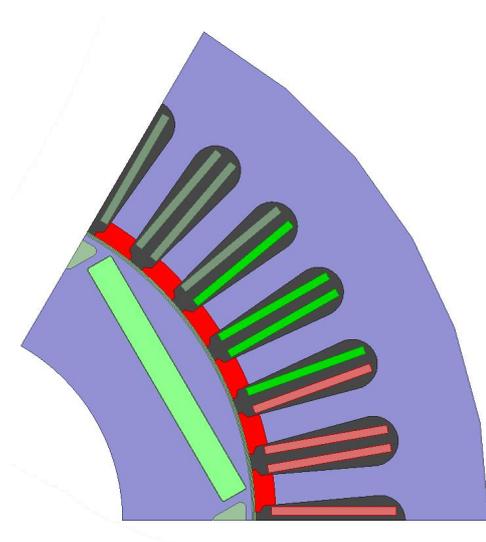


图 4-48 原边三相电流图 (SiMag383)

#### 4.8. 案例八：IPMSM 空载仿真

本案例将对一台内嵌式永磁同步电机 (IPMSM) 模型进行空载仿真的计算。如图 4-1 所示为该电机模型及模型参数。



名称	数值
额定转速/rpm	2000
极对数	3
定子槽数	36
绕组并联支路数	2
每相串联绕组匝数	29
25℃相电阻/Ω	0.80
定子内径/mm	124.00
定子外径/mm	180.00
气隙长度/mm	0.60
电机轴长/mm	90.00
永磁剩磁/T	1.23
永磁体相对磁导率	1.10
永磁体电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	625000
硅钢片型号	50DW465
涡流损耗系数/(W·m <sup>-3</sup> ·Hz <sup>-2</sup> ·T <sup>-2</sup> )	0.822
磁滞损耗系数/(W·m <sup>-3</sup> ·Hz <sup>-2</sup> ·T <sup>-2</sup> )	190.00

图 4- 1

在开始前，新建一个空文件夹作为工作路径（workpath），如本案例中设定 workpath 为 C:/Users/86152/Desktop/EM。

#### 4.8.1. 从 ANSYS 导出

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析（FEA）软件。本例把 ANSYS 软件中已经建成的电机模型导出 step 文件，以便后续借助 Gmsh 和 Simag 进行仿真计算。

首先，打开 ANSYS 软件。如图 4-2 所示，点击左上角 File 部分中 Open 选项，打开已经在 ANSYS 中完成建模的电机模型（文件后缀为 aedt）。

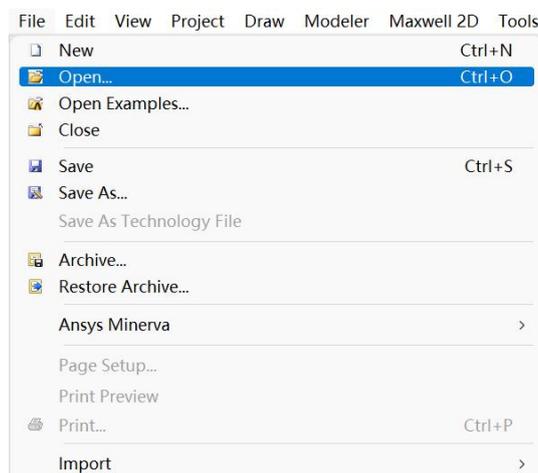


图 4- 2

打开 aedt 文件后将出现电机模型，如图 4-3 所示，再从左上角 Modeler 部分中，选择 Export 选项进行文件导出。

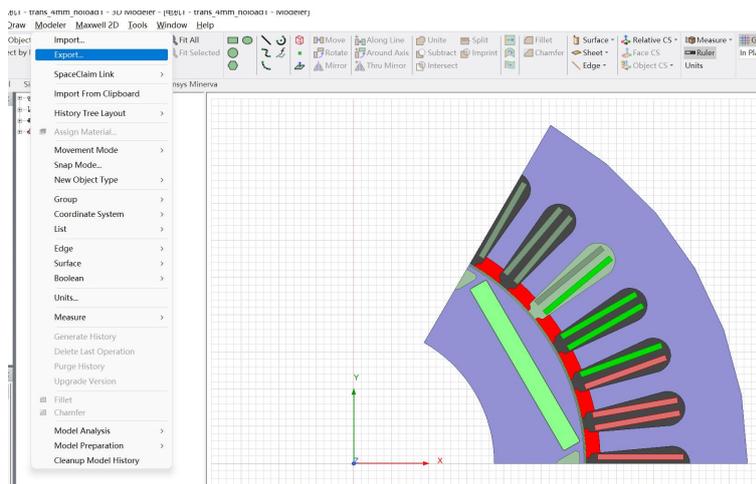


图 4- 3

保存文件名为 EM.step，并更改文件保存类型为 STEP Files (\*.step;\*.stp)，如图 4-4 所示，并将 step 文件移动至工作路径 C:/Users/86152/Desktop/EM 中。

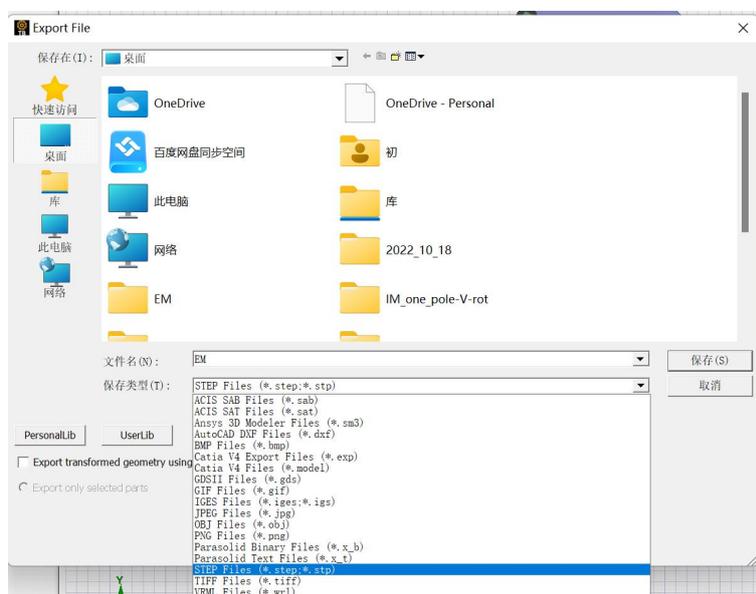


图 4- 4

至此，ANSYS 中的模型导出完成。

## 4.8.2. Gmsh 几何建模

本节将对本章第一节中导出的 step 文件进行设置，使该模型适用于 Gmsh 软件，从而进一步能够在 Simag 中进行有限元计算。

### 4.8.2.1. 新建文件

打开 Gmsh，在 Gmsh 的界面中点击 File->New 创建新文件，如图 4-5 所示，保存在工作路径文件夹中，命名为 EM.geo。并在弹出来的对话框中，选择 OpenCASCADE。

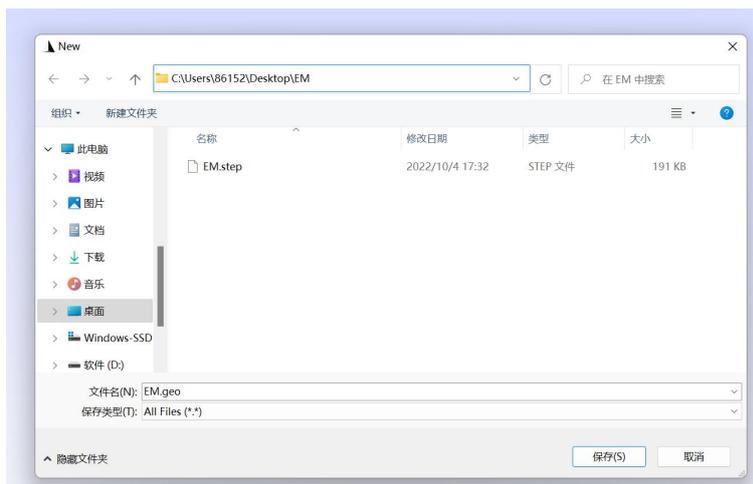


图 4- 5

#### 4.8.2.2. 导入 EM.step

在左侧模块栏中，点击 Modules->Geometry->Edit script，打开 EM.geo 脚本文本，此时脚本文件有 2 行指令，如图 4-6 所示。

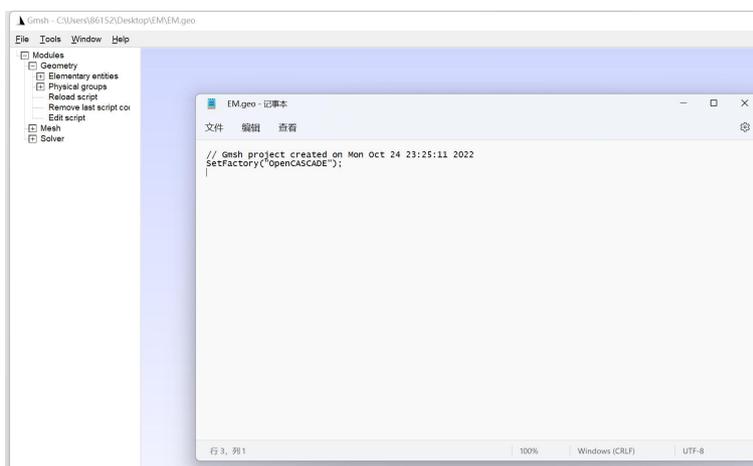


图 4- 6

下一步，如图 4-7 所示。在脚本文件中输入第 3、4 行相应 Load 指令，导入 EM.step；并输入第 5、6 行相应 Coherence 指令，合并模型中重复的线和重复的点。



图 4-7

编辑完成后，保存并关闭脚本文件，在 Gmsh 界面按数字 0 重新导入。此时，Gmsh 中将加载出本案例电机模型截面，如图 4-8 所示。

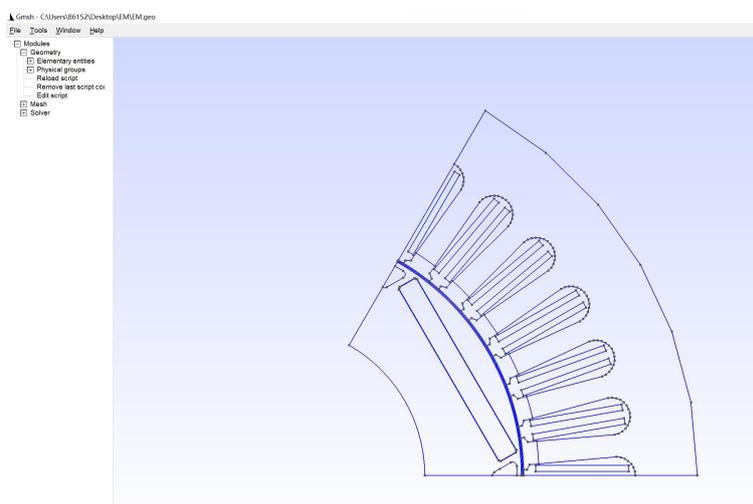


图 4-8

#### 4.8.2.3. Physical region 设置

所谓 Physical region 就是将具有相同属性的几何区域组合在一起，这样在有限元模型中对于不同的物理域就可以设置不同的参数。本节将对案例电机模型进行 Physical region 设置。本模型中共有 25 个 Physical Surface 和 2 个 Physical Curve，他们的作用如表 1 和表 2 所示。

名称	编号	物理意义
Air	1	空气
Rotor	2	转子硅钢片
PM	3	永磁体
Stator, ST1, ST2, ST3, ST4, ST5, ST6	4, 17, 18, 19, 20, 21, 22	定子硅钢片
AP1, AP2, AP3, AP4	5, 6, 7, 8	A 相绕组
BP1, BP2, BP3, BP4	9, 10, 11, 12	B 相绕组

CN1, CN2, CN3, CN4	13, 14, 15, 16	C 相绕组
inner_air	23	内层气隙
mid_air	24	中间层气隙
out_air	25	外层气隙

表 1

名称	编号	物理意义
out	1	施加第一类边界条件
band	2	mid_air 和 inner_air 的交接线

表 2

首先定义 Air 区域。从左侧模块栏中，点击 Modules->Geometry->Physical region->Add->Surface，依次单击选中模型中除了气隙之外的所有空气域。本例中为 plane16, plane23, plane24, plane25, plane26, plane27, plane28, plane30, plane31, plane33，将其命名为 Air，编号 1，并按 e 确认，如图 4-9 所示。Physical Surface("Air", 1)即表示空气所属的物理区域。

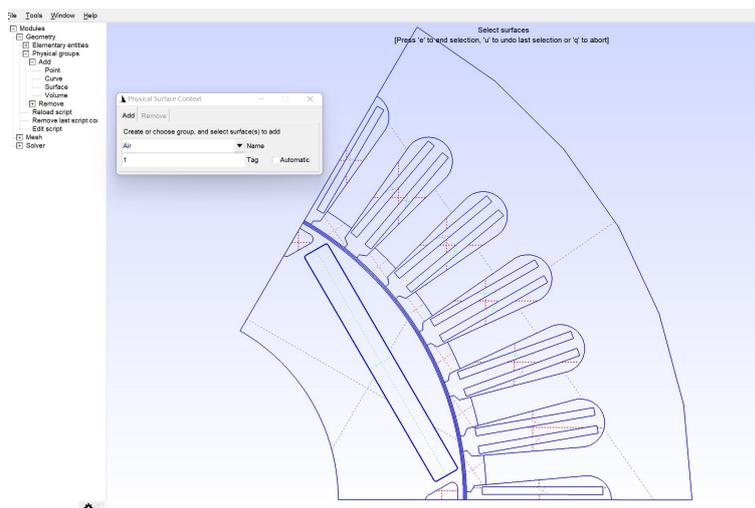


图 4- 9

此时脚本如图 4-10 所示。

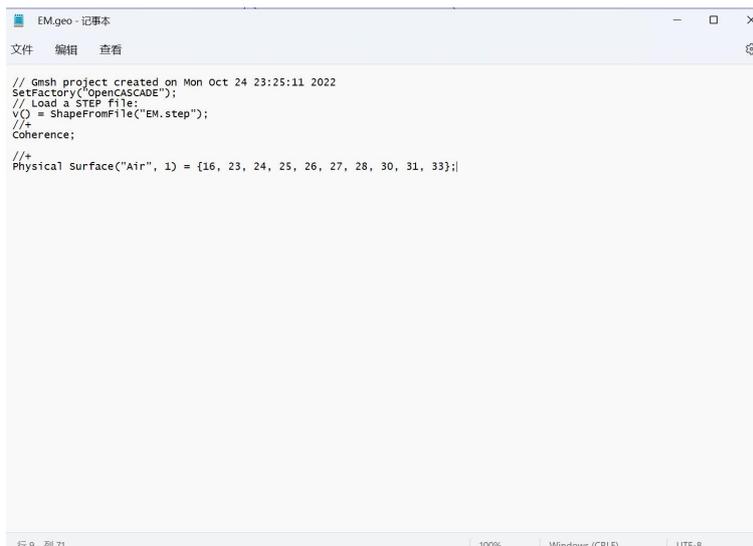


图 4-10

按照上述操作依次点击进行定义，或按照脚本格式书写，定义本模型其余 Physical Surface 和 Physical Curve (Physical Curve 与 Physical Surface 操作类似，从左侧模块栏中，点击 Modules->Geometry->Physical region->Add->Curve)。定义完成后，保存并关闭，按数字 0 重新导入。此时脚本文件及模型的 Physical region 如图 4-11 所示。

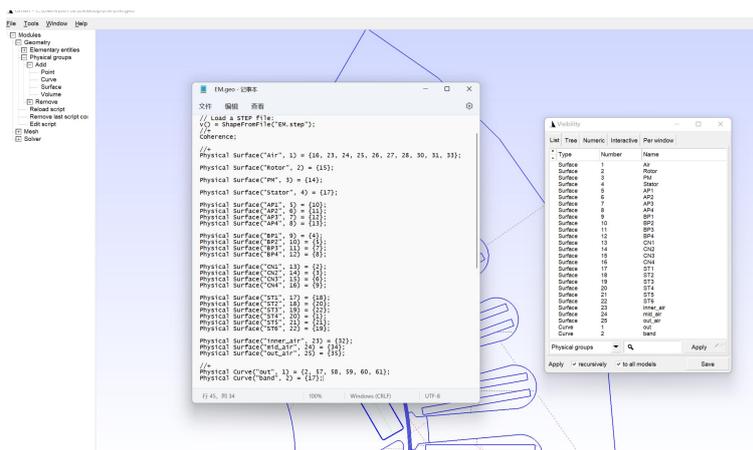


图 4-11

#### 4.8.2.4. 网格设置

设置完 Physical region 后，在 Gmsh 中按数字 2，出现当前模型自动二维网格剖分情况，如图 4-12 所示。可见此时网格剖分较不合理，边缘处网格剖分反而较为密集，会大大影响计算速度和计算精度。因此，下面将对不同区域网格尺寸大小进行规定。

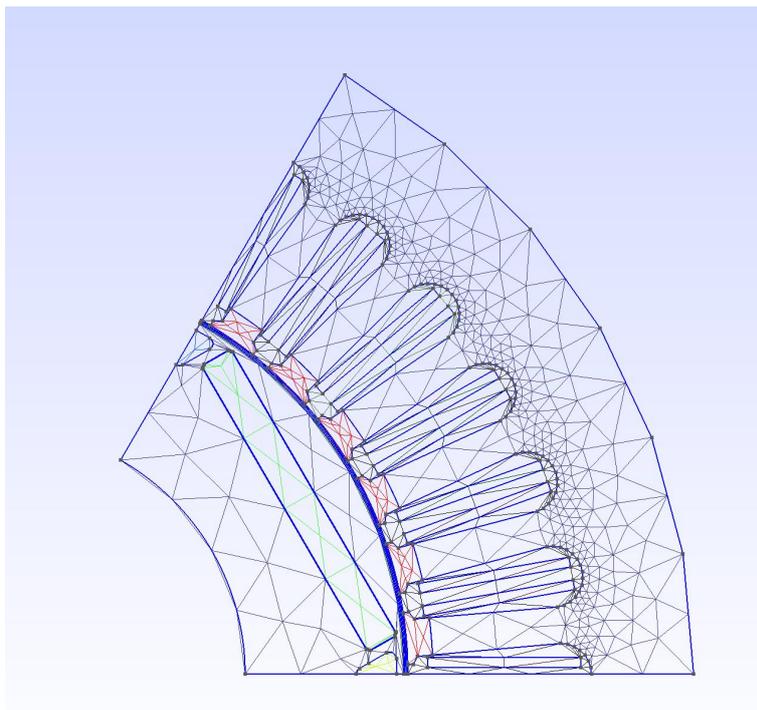


图 4- 12

#### 4.8.2.4.1. 中间层气隙网格设置

首先对气隙处网格进行设置。将中间气隙层采用四边形网格，在 Gmsh 左侧模块栏中，点击 Modules->Mesh->Define->Transfinite->Curve 把中间气隙层的线进行等分，从而对网格数量进行设置。

本例中设置中间气隙与两侧气隙交界处等分为 135 段，故应设置 136 个点进行等分；另外两侧与空气交界处设置为 1 段，故应设置 2 个点进行等分。Type 均选择 Progression，Parameter 设置为 1，表示均匀剖分，并按 e 确认。分别如图 4-13 和图 4-14 所示。

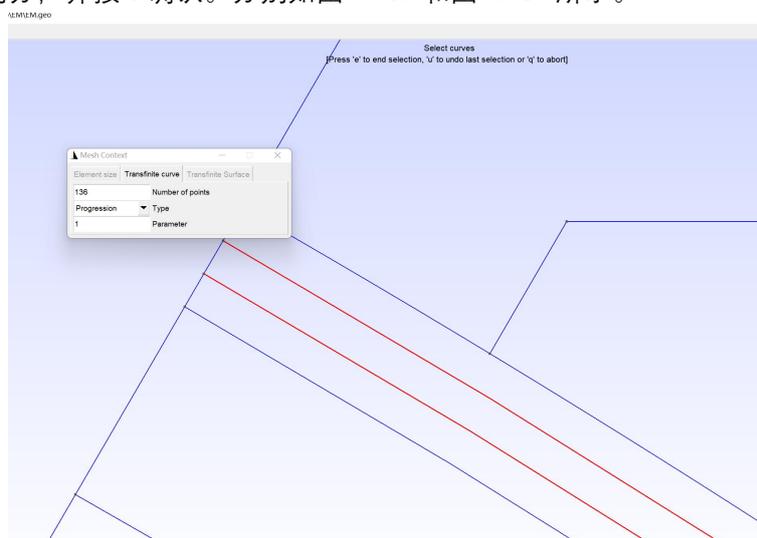


图 4- 13

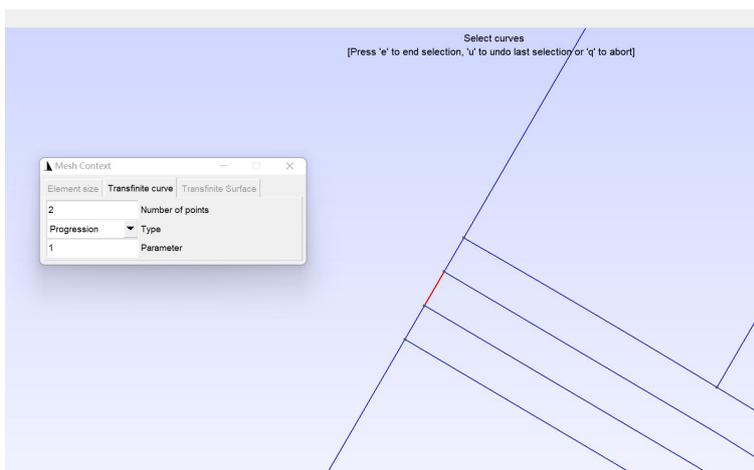


图 4- 14

剖分完成后，使用 Recombine 命令使中间层气隙重组，此时中间层气隙网格剖分情况和脚本文件指令如图 4-15 所示。

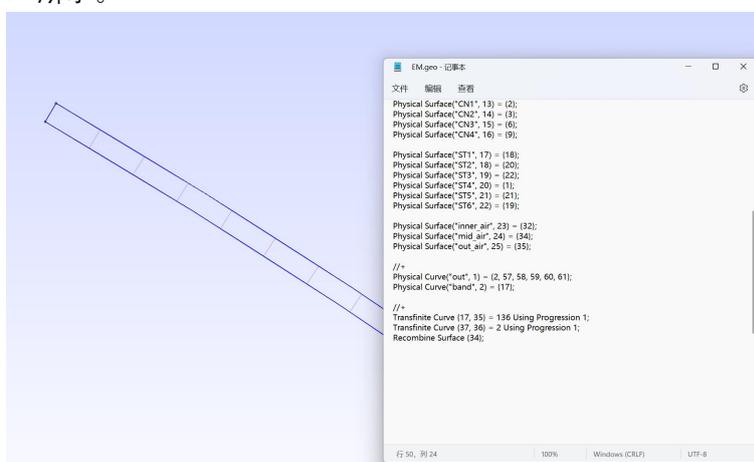


图 4- 15

#### 4.8.2.4.2. 其余区域网格设置

下面采用 Size at points 功能在其余区域的点上，规定点周围剖分网格大小。首先，直接在脚本文件中对不同网格大小进行定义，本例中定义了 4 种剖分程度，分别为 0.5、1、2、3，如图 4-16 所示。

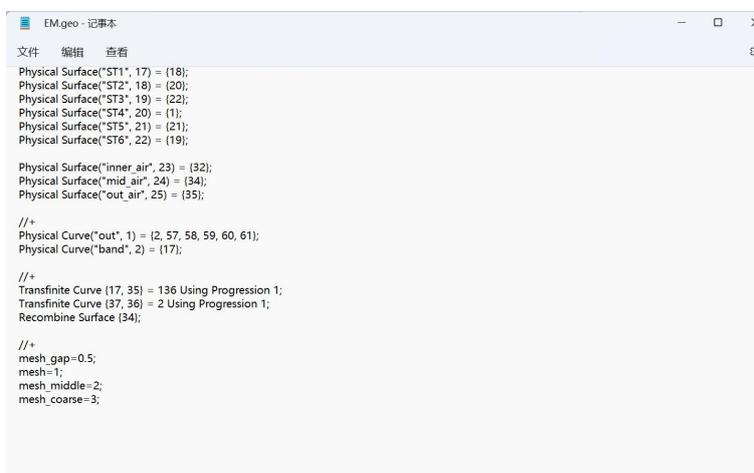


图 4- 16

在左侧模块栏中，点击 Modules->Mesh->Define->Size at points，依次选中想要规定的点，并在 Element size 处输入网格尺寸即可。

以定子硅钢片为例（在 Tools->Visibility->Physical groups 中可选中并单独显示 Stator 部分，方便后续处理），依次选中定子硅钢片最外侧的 7 个点，此处剖分稀疏即可，故设置网格尺寸为前文所定义的 mesh\_coarse，并按 e 确认，如图 4-17 所示。

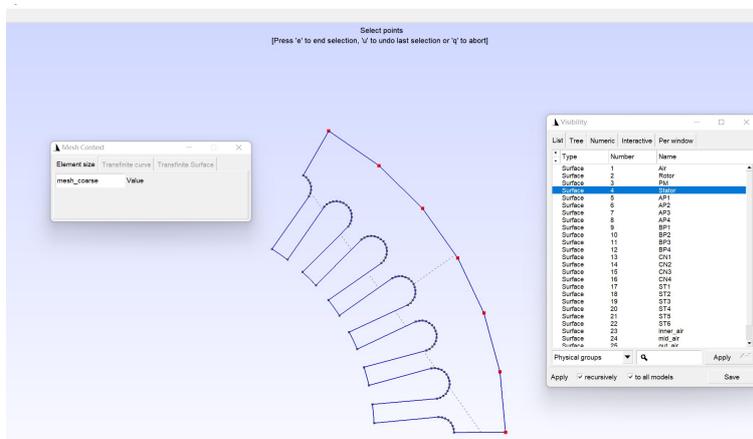


图 4-17

依次选中定子硅钢片轭部的 91 个点（可按住 Ctrl 加左键用框快速选中），此处剖分比最外侧略微密集，故设置网格尺寸为 mesh\_middle，如图 4-18 所示。

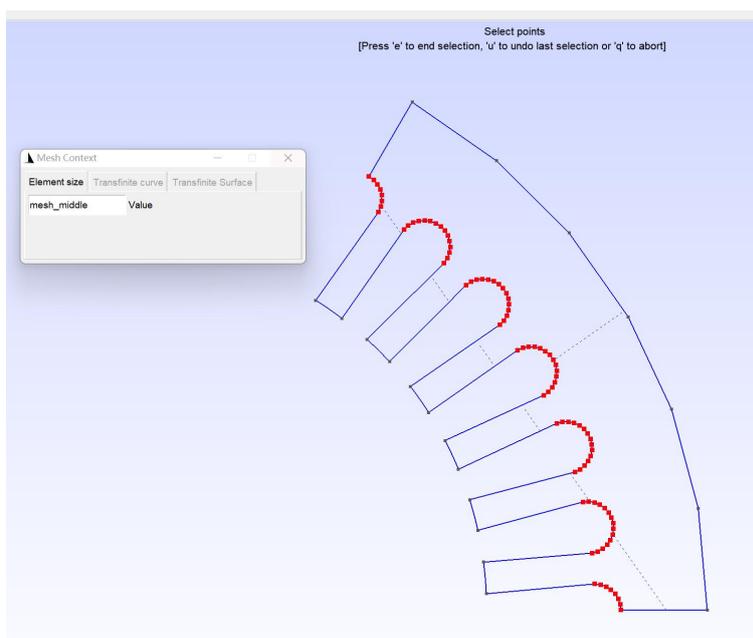


图 4-18

下面依次选中定子硅钢片齿部的 48 个点，此处剖分更加密集，故设置网格尺寸为 mesh，如图 4-19 所示。

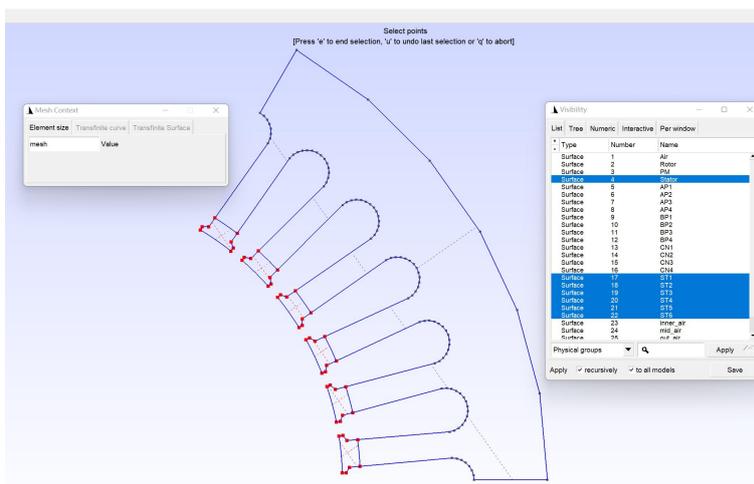


图 4- 19

此时定子硅钢片网格设置完成，此时二维网格剖分情况和脚本指令如图 4-20 所示。

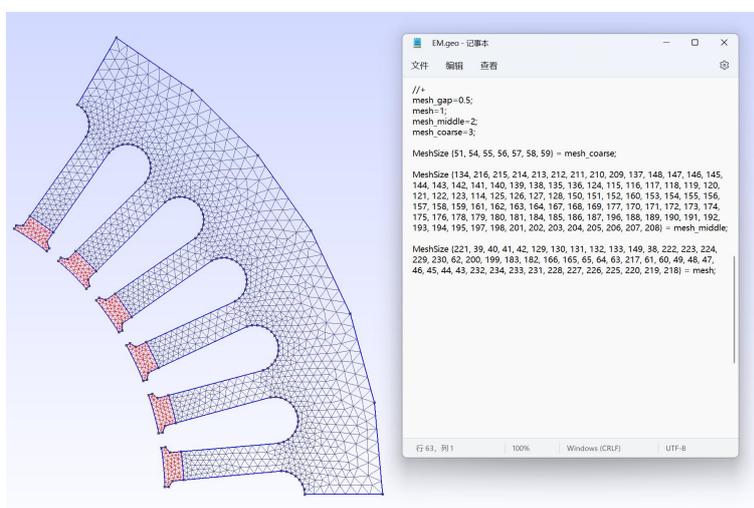


图 4- 20

同理，按照计算速度和计算精度的要求，对其他区域进行网格设置。设置完成后，模型二维网格剖分情况与脚本如图 4-21 所示。

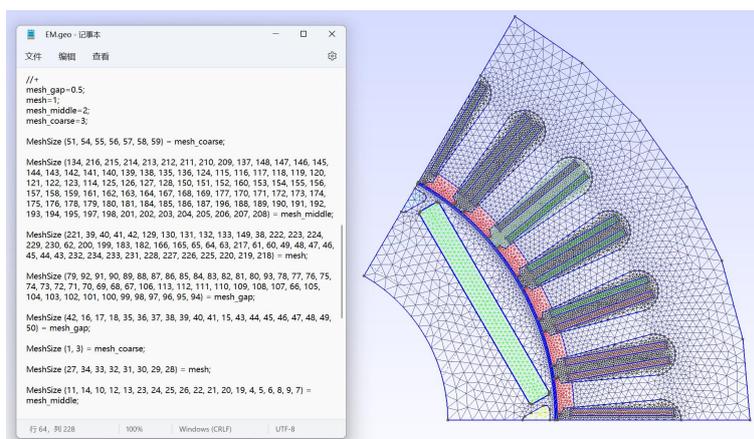


图 4- 21

#### 4.8.2.5. Sidelink 边界设置

由于本案例只取电机的 1/6 模型，为了实现对旋转周期对称边界条件或者旋转反周期对称边界

条件的设置，需要在 side 边界线上和 link 边界线上的剖分完全一致。

在边界线的网格控制上使用 Transfinite Line 的命令去将对应边界上线网格剖分的完全一致。在左侧模块栏中，点击 Modules->Mesh->Define->Transfinite->Curve，选中需要设置边界条件的线，进行设置。

以转子硅钢片为例。如图 4-22 所示，选中边界线，将其等分为 7 份，故设置 Number of points 为 8 个点，进行等分。Type 选择 Progression，Parameter 设置为 0.95，表示公比为 0.95 的等比关系进行递增剖分。

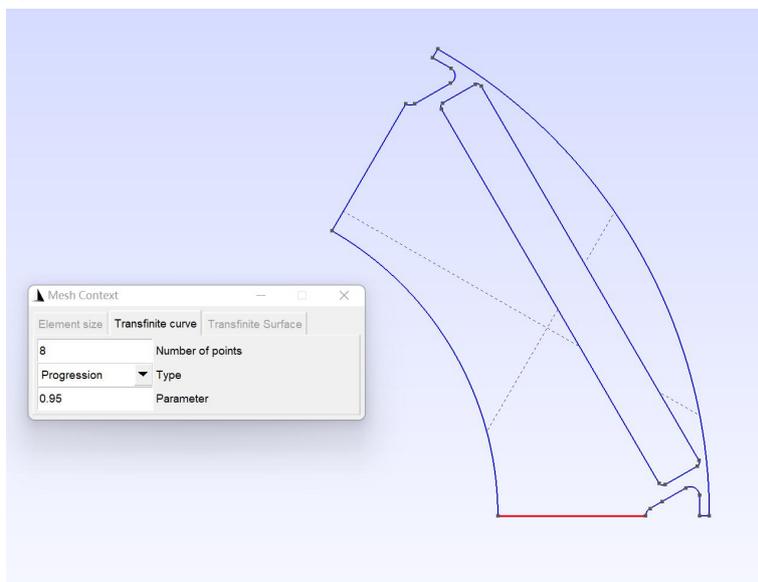


图 4- 22

接下来，选中 60°处对应的边界，设置相同参数，进行剖分，此时脚本文件如图 4-23 所示。（注意：本案例中，此时两边界递增关系相反，故应在脚本文件中更改 Curve{117}为 Curve{-117}，此时剖分才符合要求！）

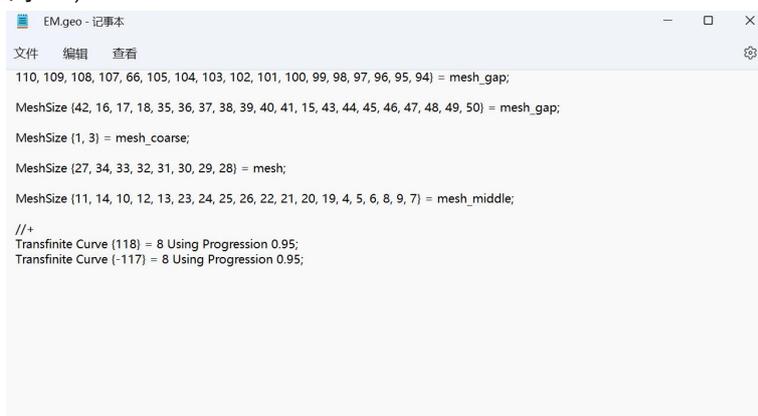


图 4- 23

同理，按照网格剖分要求，对其余边界进行设置。最终本案例电机模型二维网格剖分情况与脚本如图 4-24 所示。

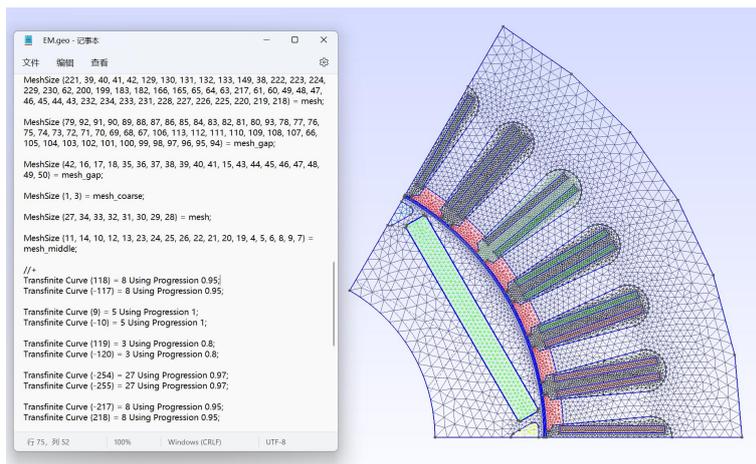


图 4- 24

至此，本案例电机 Gmsh 模型构建完成，将 EM.geo 文件保存在 workpath 中。

### 4.8.3. Simag383 初始设置

运行 Simag383.exe 打开软件操作界面。单击“设置工作目录”按钮，将当前工作路径设置为 C:/Users/86152/Desktop/EM。将几何建模与网格剖分处 Geo 文件设置为 4.8.2 节中构建完成的 EM.geo，参数文件不需要进行额外处理，单击下方“打开参数文件”，即可生成默认文件 para.geo。

设置完成后，单击“查看几何模型”和“生成网格”对变压器模型与区域名称进行核对检验。此时 Simag383 操作界面如图 4-25 所示。

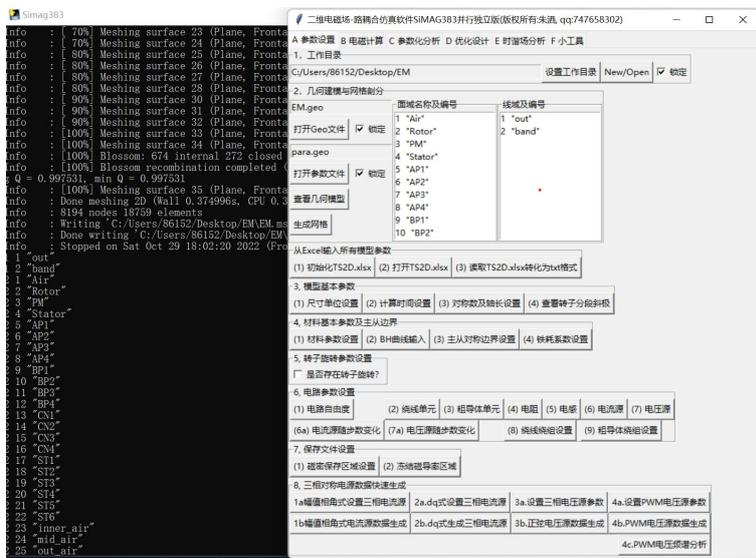


图 4- 25

### 4.8.4. 通过 Excel 文件输入模型参数

单击“ (1) 初始化 TS2D.xlsx”按钮，自动生成命名为 EM\_TS2d.xlsx 的 excel 文件。再点击“ (2) 打开 TS2D.xlsx”按钮打开 EM\_TS2d.xlsx，如图 4-26 所示。用户只需要按照约定的规则，在这个文件中的三个工作表 basical parameters、material、circuit 中，分别输入有限元计算所需的所有参数即可。

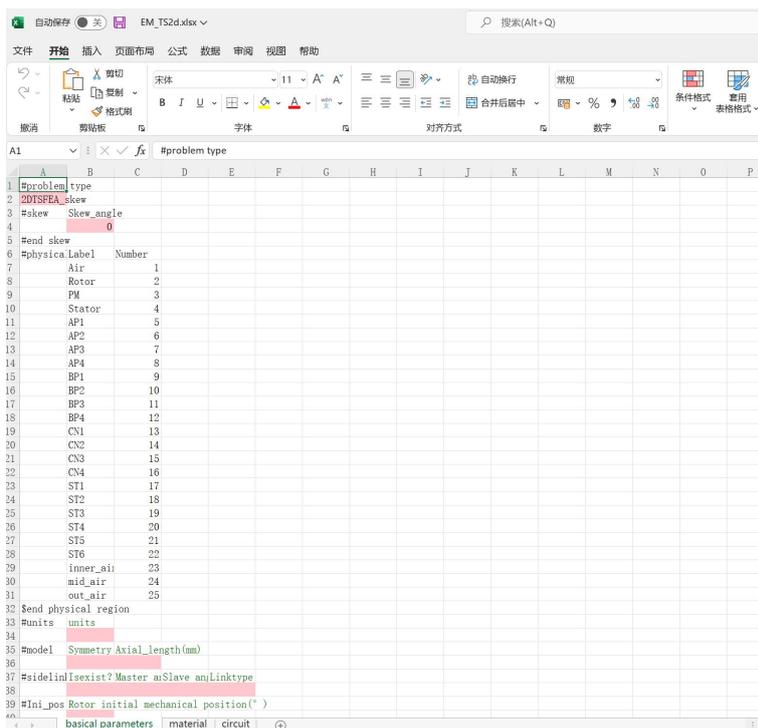


图 4- 26

本章仅介绍模拟该永磁同步电机空载运行所需要修改初始 EM\_TS2d.xlsx 的部分。

#### 4.8.4.1. basic parameters 设置

##### 4.8.4.1.1. #units

**units** 表示模型的数据单位。对于本例电机模型，数据单位设置为 mm。设置完成后如图 4- 27 所示。

#units	units
	mm

图 4- 27

##### 4.8.4.1.2. #model

此项设置模型对称数及轴向长度。

**Symmetry number** 表示模型的对称数。本例建模时只取了电机的 1/6 模型，故对称数设置为 6。

**Axial\_length(mm)** 表示模型轴向长度。根据本例电机规定尺寸，轴向长度为 90mm。

设置完成后如图 4- 28 所示。

#model	Symmetry number	Axial_length(mm)
	6	90

图 4- 28

##### 4.8.4.1.3. #sidelink

此项表示 sidelink 主从边界设置。

**Isexist?** 表示主从边界是否存在。对于本例电机模型，需要设置边界。设置为 Yes。

**Master angle(°)** 表示主边与 x 轴夹角。设置默认值为 0。

**Slave angle(°)** 表示从边与 x 轴夹角。本例取 1/6 模型，故边界处为 60°，设置为 60。

**Linktype** 表示周期边界类型（1 为周期边界，-1 为反周期边界）。本例所取的 1/6 部分应为反周期边界，设置为-1。

设置完成后如图 4- 29 所示。

#sidelink	Isexist?	Master angle(°)	Slave angle(°)	Linktype
	Yes	0	60	-1

图 4- 29

#### 4.8.4.1.4. #Ini\_pos

Rotor initial mechanical position(°)表示转子初始时刻角度。初始设置为 0。  
设置完成后如图 4- 30 所示。

#Ini_pos	Rotor initial mechanical position(°)
	0

图 4- 30

#### 4.8.4.1.5. #gap mesh

此项设置电机气隙网格剖分情况。

Mesh number 表示气隙处剖分的网格数量。本例在 Gmsh 中间层气隙网格设置为了 135 段，故此处同样设置为 135。

Total mechanical angle(°)表示需要剖分气隙网格的总机械角度。本例取 1/6 电机模型，故总机械角度设置为 60。

设置完成后如图 4- 31 所示。

#gap mesh	Mesh number	Total mechanical angle(°)
	135	60

图 4- 31

#### 4.8.4.1.6. #torque region

Region Labels:...表示用于计算转矩的气隙区域。设置为 inner\_air 和 out\_air 区域。  
设置完成后如图 4- 32 所示。

#torque region	Region Labels:...
	inner_air out_air

图 4- 32

#### 4.8.4.1.7. #isrotation

此项设置转子旋转情况及转子永磁体参数。

#Is rotation?表示转子是否旋转，设置为 Yes。

Physical Region 表示转子上永磁体区域。设置为 Gmsh 几何建模中命名为 PM 的区域。

Magnetization angle(°)表示磁化方向。根据本例电机模型，转子永磁体所在位置应设置为 30° 方向处。

Br(T)表示永磁体剩磁。根据本例电机模型，设置为 1.23T。

ur 表示永磁体相对磁导率。根据本例电机模型，设置为 1.10。

设置完成后如图 4- 33 所示。

#isrotation	#Is rotation?			
	Yes			
\$rotor PM	Pyhsical Region	Magnetization angle(°)	Br(T)	ur
	PM	30	1.23	1.1
\$end rotor PM				

图 4- 33

#### 4.8.4.1.8. #Time0、#Position

这两项分别表示模拟的时间与步数。本例中计划模拟 10ms，120 步。

Start Time(ms)、Start Position(°)为初始时间和位置，均默认为 0 不用修改。

Position step(°)表示每一步电角度变化，根据本例参数规定设置为 1°。

Total\_step\_number 表示模拟总步数，设置为 120 步。

Time\_step(ms)表示每一步的时长，共 10ms，120 步，设置为  $10/120=1/12\text{ms}$ 。

End Time(ms)表示结束时间，每步  $1/12\text{ms}$ ，共 120 步，从 0 开始为第一步，所以此处设置为  $(1/12)*199=199/12\text{ms}$ 。

设置完成后如图 4-34 所示。

#Time0	Start Time(ms)	End Time(ms)	Time step(ms)
	0	9.916666667	0.083333333
#Position	Start Position(°)	Position step(°)	Total step number
	0	1	120

图 4-34

#### 4.8.4.1.9. #Bregion、#fdvregion

这两项分别表示磁密与磁导率的参数保存类型和位置，默认设置为 type2 和 type1。

设置完成后如图 4-35 所示。

#Bregion	Coordinate type(1: for xy; 2: for cylinder)	Region Labels...
		2
#fdvregion	type (1: FDRTM; 2: FDPM; 3: FPM)	Region Labels...
		1

图 4-35

#### 4.8.4.2. material 设置

##### 4.8.4.2.1. #BH\_curves

此项设置本例电机所用硅钢片材料的磁化曲线参数。

Label表示硅钢片材料名称，我们选取 50DW465 型硅钢片。

Magnetic field H(A/m)表示磁场强度，Flux density B(T)表示磁感应强度，参考相关资料选取 50DW465 的磁化曲线数据。

设置完成后如图 4-36 所示。

#BH_curves	Label	Magnetic field	Flux density
\$BH	50DW465	H (A/m)	B(T)
		0	0
		64	0.4
		68	0.45
		72	0.5
		75	0.55
		77	0.6
		79	0.65
		80	0.7
		84	0.75
		88	0.8
		96	0.85
		104	0.9
		112	0.95
		121	1
		134	1.05
		143	1.1
		167	1.15
		189	1.2
		223	1.25
		263	1.3
		318	1.35
		430	1.4
		669	1.45
		995	1.5
		1592	1.55
		2548	1.6
		3742	1.65
		5096	1.7
		6688	1.75
		10098	1.8
		15029	1.85
		21045	1.9
		28061	1.95
		38191	2
		51338	2.05
		70038	2.1
		102070	2.15
		130740	2.2
		161790	2.25
\$end BH			
#end BH_curves			

图 4- 36

#### 4.8.4.2.2. #material

此项设置 Gmsh 几何建模中不同部分 physical region 的材料及参数。

Relative permeability 表示不同区域的相对磁导率。对于空气、三相绕组导线、三层气隙部分，我们设置相对磁导率为 1。对于电机的定转子部分的相对磁导率，我们选取非线性材料硅钢片

50DW465 参数。对于永磁体的相对磁导率，根据此模型规定参数，设置为 1.1。

Current density (A/m<sup>2</sup>)表示外加激励电流的密度。本例通过场耦合模拟电机空载运行，不需要额外加入电流，全部默认为 0。

Br(T)表示剩磁。根据模型规定参数，永磁体剩磁设置为 1.23，其余部分剩磁均为 0。

Magnetization angle (°)表示磁化方向。根据本例电机模型，转子永磁体所在位置应设置为 30° 方向处，其余部分默认为 0。

Conductivity (S/m)表示电导率。绕组区域虽然是铜导线，但是作为细导线区域，电导率设置为 0。永磁体根据材料参数要求，电导率设置为 625000S/m。电机其余部分电导率均默认为 0。

设置完成后如图 4-37 所示。

#material	Region Label	Relative permeability	Current density (A/m <sup>2</sup> )	Br(T)	Magnetization angle (°)	Conductivity (S/m)
	Air	1	0	0	0	0
	Rotor	50DW465	0	0	0	0
	PM	1.1	0	1.23	30	625000
	Stator	50DW465	0	0	0	0
	AP1	1	0	0	0	0
	AP2	1	0	0	0	0
	AP3	1	0	0	0	0
	AP4	1	0	0	0	0
	BP1	1	0	0	0	0
	BP2	1	0	0	0	0
	BP3	1	0	0	0	0
	BP4	1	0	0	0	0
	CN1	1	0	0	0	0
	CN2	1	0	0	0	0
	CN3	1	0	0	0	0
	CN4	1	0	0	0	0
	ST1	50DW465	0	0	0	0
	ST2	50DW465	0	0	0	0
	ST3	50DW465	0	0	0	0
	ST4	50DW465	0	0	0	0
	ST5	50DW465	0	0	0	0
	ST6	50DW465	0	0	0	0
	inner_air	1	0	0	0	0
	mid_air	1	0	0	0	0
	out_air	1	0	0	0	0
#end material						

图 4-37

#### 4.8.4.2.3. #coef\_iron

此项根据电机材料，设置电机内铁耗区域的铁耗系数。

Region Label表示铁耗区域。电机内铁耗区域设置为 Rotor 和 Stator。

Eddy current loss coefficients(W/m<sup>3</sup>/Hz<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>)表示涡流损耗系数。根据本例电机模型参数规定，设置为 0.822W/m<sup>3</sup>/Hz<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>。

Hysteresis loss coefficients(W/m<sup>3</sup>/Hz/T<sup>2</sup>)表示磁滞损耗系数。根据本例电机模型参数规定，设置为 190W/m<sup>3</sup>/Hz/T<sup>2</sup>。

设置完成后如图 4-38 所示。

#coef_iron	Region Label	Eddy current loss coefficients(W/m <sup>3</sup> /Hz <sup>2</sup> /T <sup>2</sup> )	Hysteresis loss coefficients(W/m <sup>3</sup> /Hz/T <sup>2</sup> )
	Rotor	0.822	190
	Stator	0.822	190
#end coef_iron			

图 4-38

#### 4.8.4.3. circuit 设置

##### 4.8.4.3.1. #Lpnode

本例电机在三相正弦供电下的等效电路图如图 4-39 所示，此项设置该电路的自由度信息。

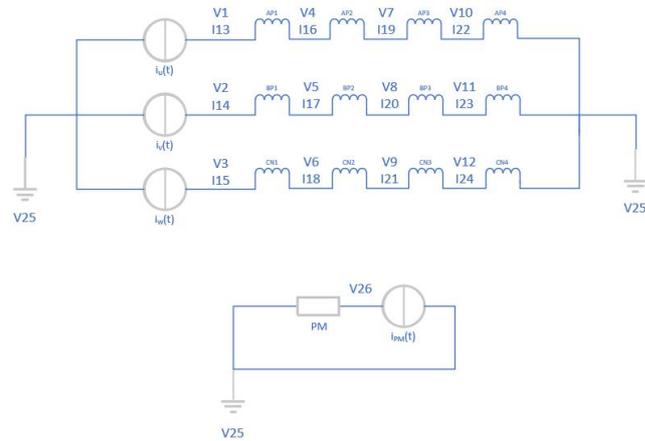


图 4- 39

Node number 表示自由度编号。电路共有 26 个自由度，分别编号 1~26。

Id0 表示自由度规格数。节点 25 为接地节点，为已知自由度，设置为-1。其余节点为未知待求自由度，设置为 1。

Disp0 表示已知自由度的给定值。节点 25 为接地节点，因此给定值为 0。其余节点为未知待求自由度，全部默认设置为 0。

Type 表示自由类型。根据等效电路图，节点 1~12、25、26 为电压节点，设置为 Vot。节点 13~24 为电流节点，设置为 Cur。

设置完成后如图 4- 40 所示。

#Lpnode	Node number	Id0	Disp0	Type
	1	1	0	Vot
	2	1	0	Vot
	3	1	0	Vot
	4	1	0	Vot
	5	1	0	Vot
	6	1	0	Vot
	7	1	0	Vot
	8	1	0	Vot
	9	1	0	Vot
	10	1	0	Vot
	11	1	0	Vot
	12	1	0	Vot
	13	1	0	Cur
	14	1	0	Cur
	15	1	0	Cur
	16	1	0	Cur
	17	1	0	Cur
	18	1	0	Cur
	19	1	0	Cur
	20	1	0	Cur
	21	1	0	Cur
	22	1	0	Cur
	23	1	0	Cur
	24	1	0	Cur
	25	-1	0	Vot
	26	1	0	Vot
#end Lpnode				

图 4- 40

#### 4.8.4.3.2. #strand

此项设置细导线单元（不考虑涡流反应的绕组区域）的接线方式。

physical region 表示 Gmsh 几何建模中所设置 physical region 的绕组名称。本例中细导线单元设置为 AP1、AP2、AP3、AP4、BP1、BP2、BP3、BP4、CN1、CN2、CN3、CN4 共 12 个绕组区域。

V1、V2、I12 表示根据电路图对应于等效电路图中相应的自由度编号。以 A 相绕组 AP1 为例，根据等效电路图，AP1 连接了 1 号电压节点和 4 号电压节点，绕组电流大小为 13 号电流节点。所以此处设置 V1 为 1，V2 为 4，I12 为 13。其余区域同理。

Direction 表示电流在有限元区域中的方向，1 表示流出纸面方向，-1 表示流入纸面方向。此处所有 A 相绕组 AP1、AP2、AP3、AP4 和 B 相绕组 BP1、BP2、BP3、BP4 的电流为流出纸面方向，设置为 1。C 相绕组 CN1、CN2、CN3、CN4 的电流为流入纸面方向，设置为-1。

Belong Winding 表示 strand 细导线单元的所属绕组。AP1、AP2、AP3、AP4 对应 A 相绕组 windA。BP1、BP2、BP3、BP4 对应 B 相绕组 windB。CN1、CN2、CN3、CN4 对应 C 相绕组 windC。

设置完成后如图 4- 41 所示。

#strand	physical region	V1	V2	I12	direction	Belong Winding
	AP1	1	4	13	1	windA
	AP2	4	7	16	1	windA
	AP3	7	10	19	1	windA
	AP4	10	25	22	1	windA
	BP1	2	5	14	1	windB
	BP2	5	8	17	1	windB
	BP3	8	11	20	1	windB
	BP4	11	25	23	1	windB
	CN1	3	6	15	-1	windC
	CN2	6	9	18	-1	windC
	CN3	9	12	21	-1	windC
	CN4	12	25	24	-1	windC
#end strand						

图 4- 41

#### 4.8.4.3.3. #winding\_stranded

此项设置细导线绕组分布情况。

Winding name 表示绕组名称。本例针对电机模型分为 A 相绕组 windA、B 相绕组 windB、C 相绕组 windC。

Total turns 表示各绕组总匝数。根据本例电机基本参数规定，三相绕组 windA、windB、windC 总匝数均设置为 29。

Phase resistance 表示绕组相电阻。根据本例电机基本参数规定，三相绕组 windA、windB、windC 电阻均设置为 0.8Ω。

Parallel number 表示绕组并联支路数。根据本例电机基本参数规定，三相绕组 windA、windB、windC 并联支路数均设置为 2。

Initial current 表示绕组初始电流。本例仅模拟电机模型空载运行状态，暂不设置初始电流激励，默认为 0。

设置完成后如图 4-42 所示。

#winding_stranded	Winding name	Total turns	Phase resistance	Parallel number	Initial current
	windA	29	0.8	2	0
	windB	29	0.8	2	0
	windC	29	0.8	2	0
#end winding_stranded					

图 4- 42

#### 4.8.4.3.4. #solid

此项设置粗导体单元（考虑涡流反应的绕组区域）的接线方式。

physical region 表示 Gmsh 几何建模中所设置 physical region 的绕组名称。本例中粗导线单元只设置 PM。

V1、V2 表示根据电路图对应于等效电路图中相应的自由度编号。根据等效电路图，PM 连接了 25 号电压节点和 26 号电压节点。所以此处设置 V1 为 25，V2 为 26。

Direction 表示电流在有限元区域中的方向，1 表示流出纸面方向，-1 表示流入纸面方向。此处电流为流出纸面方向，设置为 1。

Belong Winding 表示 solid 粗导线单元的所属绕组。此处设置 PM 对应绕组 windPM。

设置完成后如图 4-43 所示。

#solid	physical region	V1	V2	direction	Belong Winding
		PM	25	26	1
#end solid					windPM

图 4- 43

#### 4.8.4.3.5. #winding\_solid

此项设置粗导体绕组分布情况。

Winding name 表示绕组名称。本例针对电机模型，只设置 windPM 为粗导体绕组。

Initial current 表示绕组初始电流。本例对于 windPM 粗导体绕组，不设置初始电流激励，默认为 0。

Parallel number 表示绕组并联支路数。本例对于 windPM 粗导体绕组，无并联支路，默认设置为 1。

设置完成后如图 4-44 所示。

#winding_solid	Winding name	Initial current	Parallel number
	windPM	0	1
#end winding_solid			

图 4- 44

#### 4.8.4.3.6. #Res、#Leak

这两项分别设置电路中的电阻和电感。对于本例中的电机模型，不设置额外电阻和电感，因此将待输入的部分删除。

删除后如图 4-45 所示。

#Res	V1	V2	Res ( $\Omega$ )		
#end Res					
#Leak	V1	V2	I12	Inductance (H)	Initial current (A)
#end Leak					

图 4- 45

#### 4.8.4.3.7. #Cur\_S

此项设置电流源对应电路中的编号。

name 表示电流源名称。分别命名为 Iu、Iv、Iw、Ipm。

V1、V2 分别表示电流源位置对应电路中的关联自由度编号。根据等效电路图，电流源位于接地节点 25 和电压节点 1、2、3、26 的连接处。

Current(A) 表示电流源初始输入电流。本例仅模拟电机空载情况，均默认设置为 0。

设置完成后如图 4-46 所示。

#Cur_S	name	V1	V2	Current (A)
	Iu	25	1	0
	Iv	25	2	0
	Iw	25	3	0
	Ipm	25	26	0
#end Cur_S				

图 4- 46

#### 4.8.4.3.8. #CS\_input

此项设置电流源随时间变化，用于更新每步电流源的值。

Total steps 表示电流源变化的总步数。本例中模拟电机在空载运行 120 步的变化。

Label 表示电流源名称。在 Label 下方设置三相电流源 Iu、Iv、Iw 及电流源随时间变化的值，本例中模拟电机在空载运行，故电流大小均默认为 0。

设置完成后如图 4-47 所示。(120 步太过冗长, 仅展示部分)

#CS_input	Total steps:	Label...			
	120	Iu	Iv	Iw	
	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	4	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
	6	0	0	0	0
	7	0	0	0	0
	8	0	0	0	0
	9	0	0	0	0
	10	0	0	0	0
	.....	.....	.....	.....	.....
	.....	.....	.....	.....	.....
	110	0	0	0	0
	111	0	0	0	0
	112	0	0	0	0
	113	0	0	0	0
	114	0	0	0	0
	115	0	0	0	0
	116	0	0	0	0
	117	0	0	0	0
	118	0	0	0	0
	119	0	0	0	0
#end CS_input					

图 4-47

#### 4.8.4.3.9. #Vot\_S、#VS\_input

这两项设置电路中供电的电压源参数。对于本例电机模型, 不采用电压源供电, 因此将待输入的部分删除。

删除后如图 4-48 和如图 4-49 所示。

#Vot_S	name	V1	V2	I12	Voltage (V)
#end Vot_S					

图 4-48

#VS_input	Total steps:	Label...
#end VS_input		

图 4-49

至此, EM\_TS2d.xlsx 所有参数设置完成, 保存并关闭 EM\_TS2d.xlsx。此时, 工作路径文件夹共有 5 个文件, 如图 4-50 所示。

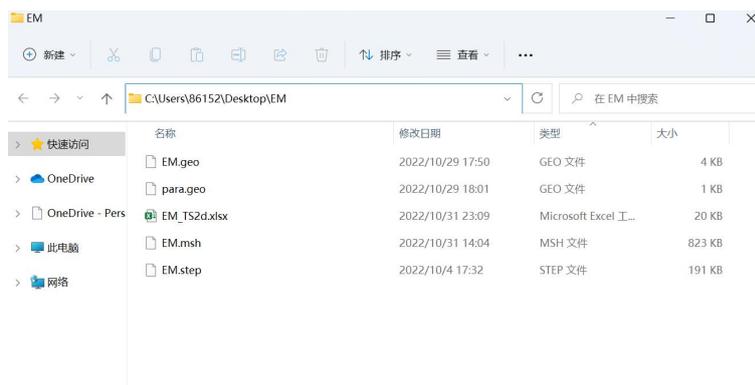


图 4- 50

接下来，在 Simag383 操作界面单击“（3）读取 TS2D.xlsx 转化为 txt 格式”按钮，本章设置好的 EM\_TS2d.xlsx 文件会根据输入信息自动生成对应 txt 文件。这时候再打开当前工作路径文件夹，会发现多出了 26 个 txt 文件，如图 4-51 所示。程序最后运行读取的也是最终工作路径文件夹里的 txt 文件。

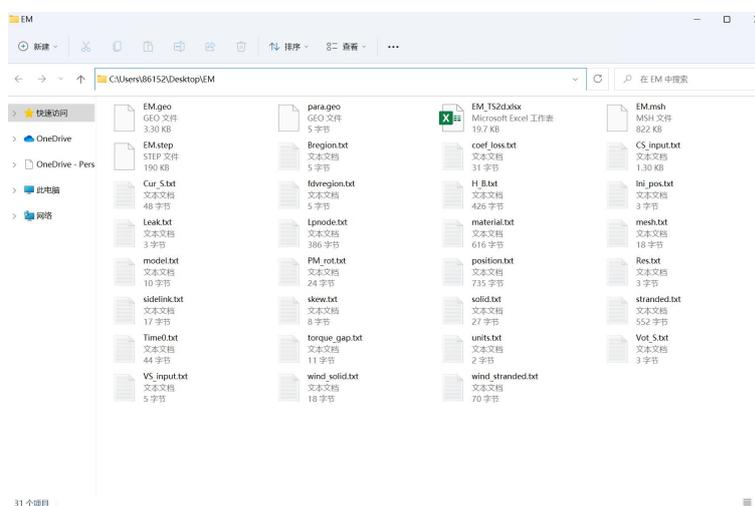


图 4- 51

#### 4.8.5. 有限元计算

通过 Simag383 软件设置参数后，接下来就可以进行有限元电磁计算。

##### 4.8.5.1. 初始化

在 Simag383 软件最上面目录栏中单击 B 电磁计算，会切换到软件的电磁计算功能。在有限元计算中单击“(1)初始化”按钮，在控制台上会看到节点数，三角单元总数等，如图 4-52 所示。

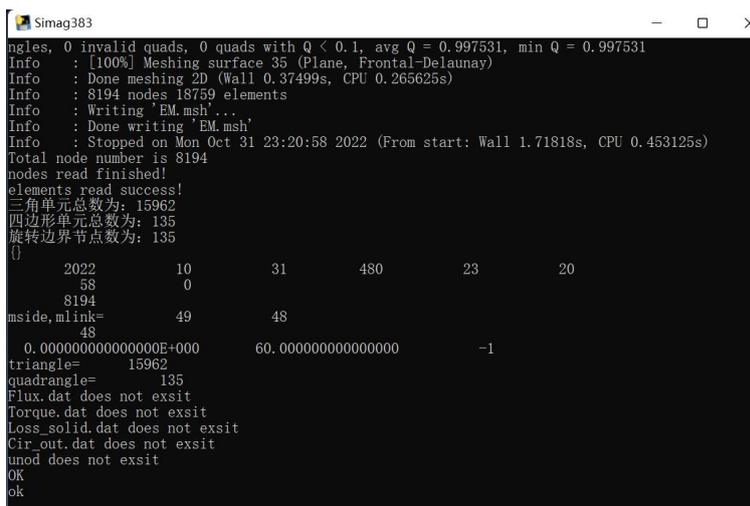


图 4- 52

此时工作路径文件夹中，又多出了 14 个无后缀文件。如图 4- 53 所示。

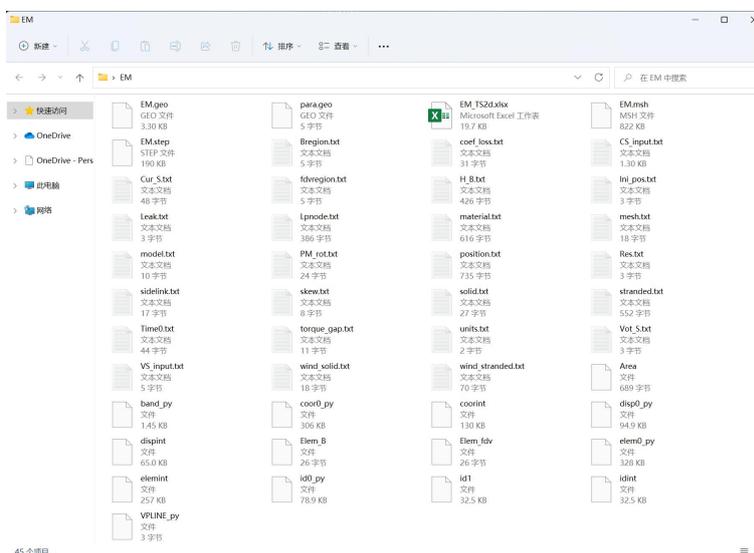


图 4- 53

#### 4.8.5.2. 进行有限元计算

当初初始化没有任何错误时，可以继续点击“(2)开始计算”进行核心计算。如果程序没有错误，对于本电机模型案例，计算将在 1min16s 后完成。控制台结果如图 4- 54 所示。



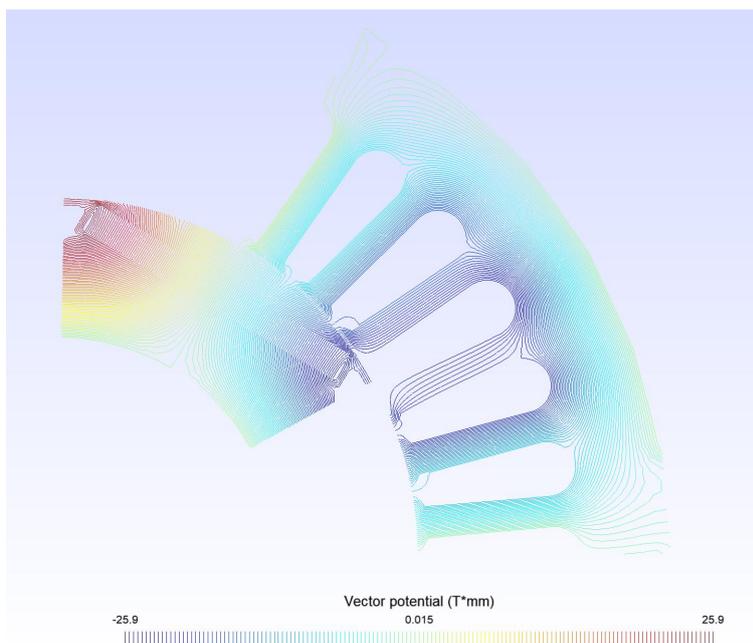


图 4- 56

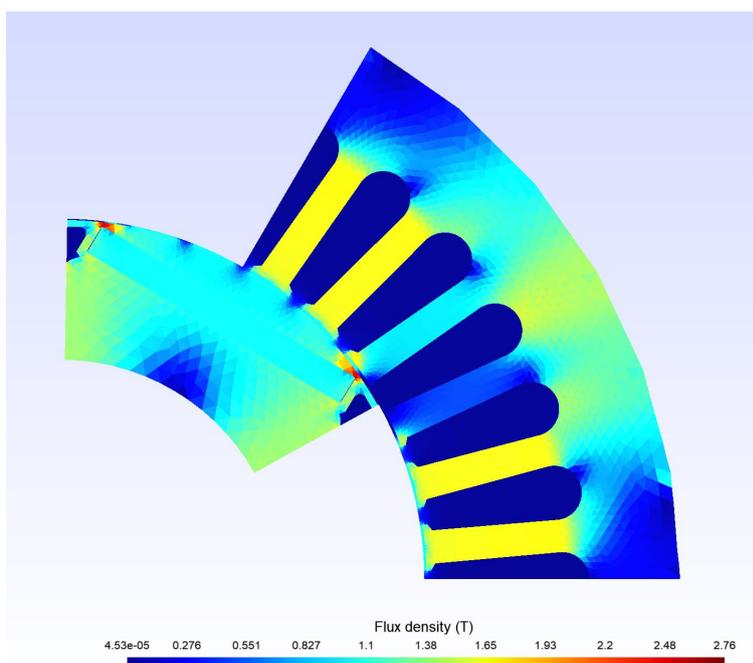


图 4- 57

点击后处理与结果的“显示转矩”按钮，可以输出转矩计算结果。通过 excel 可画图出转矩变化曲线，如图 4-58 所示。同理可输出电路的电压电流、定转子铁耗和粗导体涡流损耗等计算结果随步数变化的曲线。

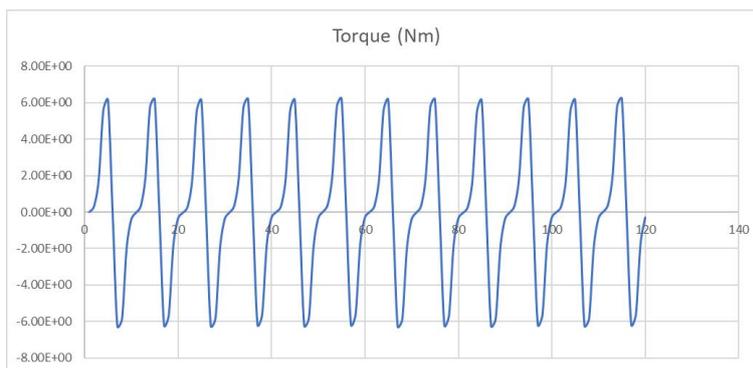


图 4- 58

## 5. 瞬态场 Txt 文件说明

### 5.1. 对应于 **basical parameters** 工作表中的 **txt**

#### 5.1.1. **Units.txt**

示例:

*mm*

用于设置几何模型尺寸的单位, 可以为 mm, m 或者 dm, 这根据 geo 文件中实际采用的单位确定。

#### 5.1.2. **model.txt**

示例:

*6.0 90*

设置模型对称数及轴向长度, 格式为:

模型对称数, 轴长 (mm)

该例表示模型对称数为 6, 轴向长度 90mm

#### 5.1.3. **sidelink.txt**

示例:

*1*

*0.0d0 60.0d0 -1*

专用于旋转电机中的旋转周期对称条件, 具体格式为:

1 or 0 (1: 表示存在旋转对称边界, 0: 不存在旋转对称边界)

Master 边与 x 轴夹角, Slave 边与 x 轴夹角, 1 或 -1

1 表示旋转周期对称条件, -1 表示反周期旋转对称边界。注意这里 1 或 -1 必须写成整数。

#### 5.1.4. **Ini\_pos.txt**

示例:

*0*

用于设置初始时刻转子的初始角度, 便于处理斜槽问题, 或分段斜极。

#### 5.1.5. **Mesh.txt**

示例:

*0.166666666666666666*

专门用于旋转电机中, 输入中间层网格气隙的剖分角度, 这是为了实现转子任意角度的旋转。比如总体机械角度为 60 度, 剖分了 360 个网格, 最小则剖分角度为  $0.166666666666666666^\circ$ 。

### 5.1.6. torque\_gap.txt

示例:

2 (用于转矩计算的气隙层数)

17 18 (每个气隙层的 physical region 编号, 写在一行即可, 无需另起一行)

### 5.1.7. PM\_rot.txt

示例:

1

1

14 30.0 1.22 1.05

说明: 第一个 1 用于判断是否存在转子旋转, 为 1 才调用 rot\_qua.exe, 进行转子旋转。第二个数字用于表示在转子上一共有几块永磁体, 1 表示只有一块永磁体。第三行数字分别表示, 永磁体编号, 初始时候与 x 轴夹角, 剩磁, 相对磁导率。

### 5.1.8. Time0.txt

初始时间 (0), 结束时间 (ms), 时间步长 (ms)

示例:

0.0 19.8333333333333 0.166666666666667

数据以毫秒 (ms) 为单位, 时间步长和 Position 中每步的角度决定频率或电机转速, 计算结束以达到结束时间或达到 Position 中的最大角度为止, 在旋转电机中取其中较小的一个; 在静止设备中则以结束时间决定计算步数。

### 5.1.9. Position.txt

在旋转电机中表示转子每步旋转的机械角度; 在静止设备中表示每步计算电角度, 具体格式为:

总计算步数

第 1 步转子机械角度 (电角度)

第 2 步转子机械角度 (电角度)

。。。

示例:

120 (120 步)

0.0

1.0

2.0

### 5.1.10. Bregion.txt

示例:

1 (需要保存磁密区域的总数) 2 (磁密的坐标类型, 1: 直角系, 2: 圆柱系)

18 (需要保存磁密第一个区域的编号)

.... (需要保存磁密第二个区域的编号, 如果有)

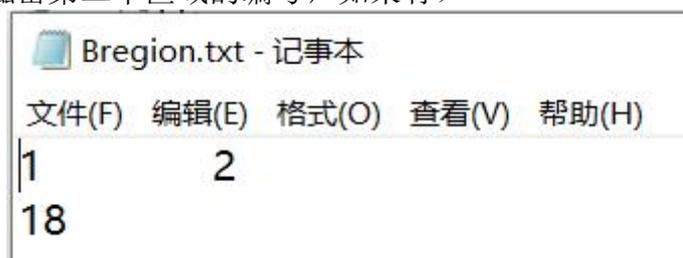


图 5-1 Bregion.txt

### 5.1.11. fdvregion.txt

示例:

0 (需要保存磁密区域的总数, 如果不需要保存则写 0) 1 (1: FDRTM; 2: FDPMP; 3: FPM)

(如果有需要保存冻结磁导率的区域, 则将这些区域的编号写在第二行)

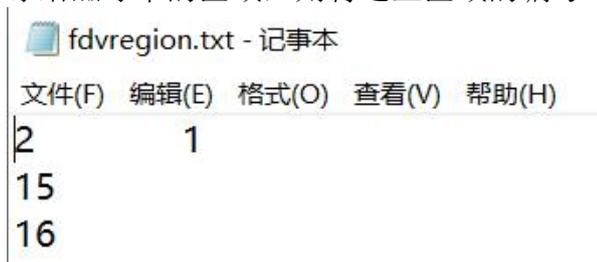


图 5-2 fdvregion.txt

### 5.1.12. skew.txt

保存转子每段的斜极角度, 定子斜槽也是通过转子均匀斜不同的角度来近似模拟的。

转子分段斜极段数

第一段斜极角

第二段斜极角

。 。 。

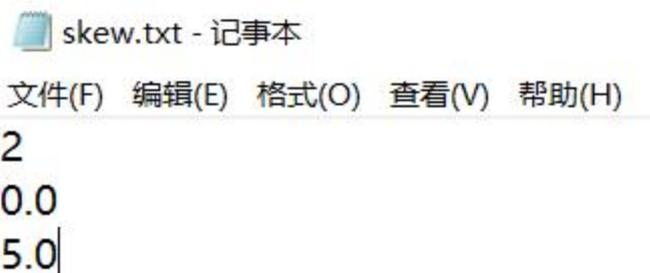


图 5-3 skew.txt

## 5.2. 对应于 material 工作表中的 txt

### 5.2.1. H\_B.txt

材料参数文件, 用于设置材料参数。具体格式为:  
其格式为:

非线性材料总数

第 1 种材料 BH 曲线数据总数

磁场强度, 磁密

磁场强度, 磁密

。 。 。

第 2 种材料 BH 曲线数据总数

磁场强度, 磁密

磁场强度, 磁密

。 。 。

。 。 。

一共可以最多可以输入 5 中非线性材料, 每种材料的 HB 点数不超过 100。

```

H_B.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
|
37
0      0
17.50302952    0.046759997
35.1349457     0.140214511
42.02974878    0.219317629
49.02921044    0.341108262
58.06578983    0.51689606
62.06226989    0.589439907
68.06540516    0.689692266
75.05292487    0.785161561
84.01523262    0.879121861
    
```

图 5-4 H\_B.txt

### 5.2.2. material.txt

材料总数

Physical region 编号, 相对磁导率, 电流密度 (A/mm<sup>2</sup>), 剩磁 (T), 永磁角度 (°), 电导率 (10<sup>6</sup>S)

.....

例:

14 1.05 0.0 1.22 30.0 0.625

比如这个例子中, Physical region 编号为 14 的永磁体, 相对磁导率为 1.05, 剩磁为 1.22T, 永磁体充磁方向与  $x$  轴夹角为  $30^\circ$ , 永磁体的电导率为  $0.625 \times 10^6$ (S)。注意对于被设置成细导线单元的区域, 尽管使用的是铜绕组, 仍将这个区域的电导率设置为 0, 因为不需要考虑这个区域的涡流反应。

对于非线性材料, 将相对磁导率设为负数如, -1.0 表示材料为非线性, 对应于 H\_B.txt 中的第一种数据; 以此类推, -2.0 对应于第二种非线性材料。

```

material.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
|
19
1      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
2      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
3      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
4      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
5      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
6      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
7      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
8      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
9      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
10     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
11     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
12     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
13     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
14     1.05     0.0      1.22     30.0     0.625
15     -2       0.0      0.0      0.0      0.0
16     -2       0.0      0.0      0.0      0.0
17     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
18     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
19     1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
    
```

图 5-5 material.txt

### 5.2.3. coef\_loss.txt

示例:

设置硅钢片铁耗系数。具体格式为:

计算铁耗的区域总数

该区域 Physical region 编号, 涡流损耗系数, 磁滞损耗系数

该区域 Physical region 编号, 涡流损耗系数, 磁滞损耗系数

。。。。

如果不需要计算铁耗, 将该文件第一行设置为 0 即可。目前程序中采用的铁耗计算模型与 Ansoft Maxwell 中一致, 后期可以根据需要拓展。



图 5-6 coef\_loss.txt

## 5.3. 对应于 circuit 工作表的 txt 文件

### 5.3.1. Lpnode.txt

保存电路新增自由度信息。如图 3-17 所示, 在电流三相电流源供电的电路中, 新增了 26 个待求解的自由度。V1, V2, .....V12, V25, V26 表示电路中不同节点的电压。I13, I14.....I24 表示电路中不同区域待求解的电流。这些信息保存在了 Lpnode.txt 中, 其具体格式为:

新增自由度总数

新增自由度编号, 自由度规格数 (1 或-1), 0.0, 自由类型 (Vot 或 Cur)

新增自由度编号, 自由度规格数, 0.0, 自由类型 (Vot 或 Cur)

。。。。

其中自由度规格数为-1 表示是强制该节点电压为 0.0, 规格数为 1 表示是该自由度是待求解的自由度。第三个数一般为 0.0 表示, 当该节点规格数为-1 是表示该节点接地, 电压为 0。自由度类型可以为电压或电流, 分别用 Vot 和 Cur 表示。



图 5-7 coef\_loss.txt

### 5.3.2. stranded.txt

保存所以细导线单元信息。细导体单元是指不考虑涡流反应的绕组, 用于关联电路和有限元区域, 一个绕组单元关联电路中的三个自由度, 分别为两端电压 V1、V2

和从节点 1 流向节点 2 的电流 I12，如图 3-18 所示。Strand.txt 中文件格式为：

细导线单元总数

粗导体 1 关联 physical region 编号, V1 在电路中自由度编号, V2 在电路中自由度编号, I12 在电路中自由度编号

绕组电阻, 绕组匝数, 绕组方向 (1.0 为正, -1.0 为负), 初始电流, 并联支路数

粗导体 2 关联 physical region 编号, V1 在电路中自由度编号, V2 在电路中自由度编号, I12 在电路中自由度编号

绕组电阻, 绕组匝数, 绕组方向 (1.0 为正, -1.0 为负), 初始电流, 并联支路数

。。。。

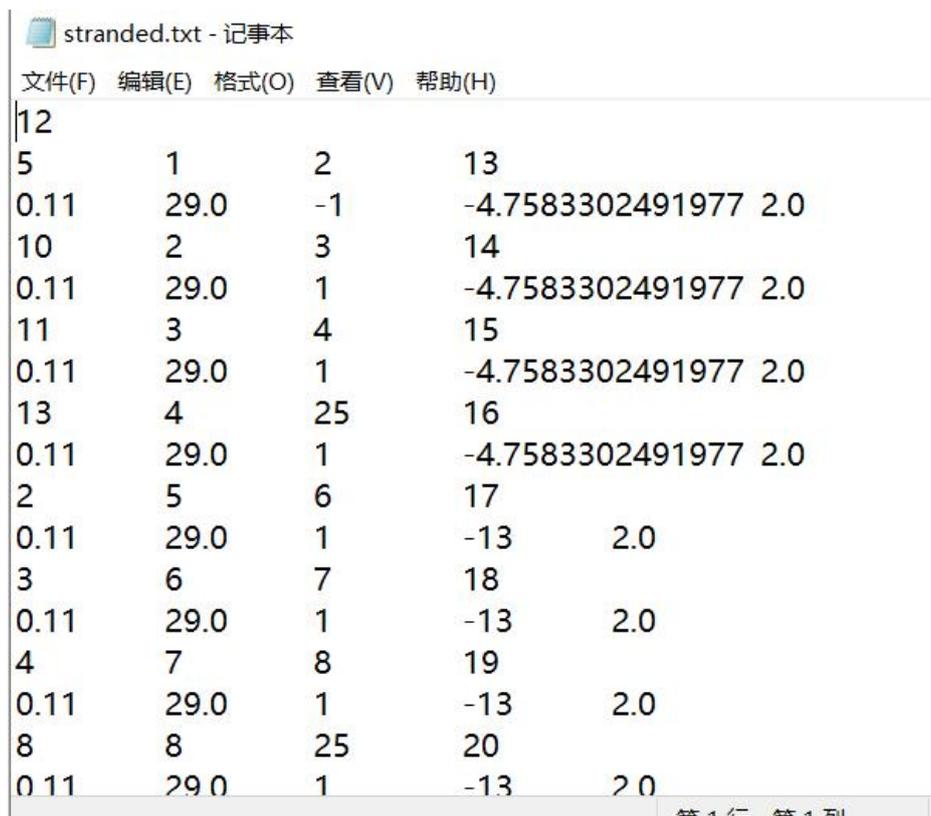


图 5-8 stranded.txt

注意在 stranded.txt 中的电阻阻值和 Excel 里#winding\_stranded 设置的单相电阻阻值不一定相同，两者之间的换算关系为：

$$R_{strand} = \frac{R_{phase}}{n_{physical}} \quad (5-1)$$

其中  $R_{phase}$  为 Excel 中输入的相电阻， $R_{strand}$  为 stranded.txt 中每个 physical region 分到的电阻， $n_{physical}$  为每相绕组中包含不同 physical region 的个数。

同样，stranded.txt 中的绕组匝数与#winding\_stranded 设置的绕组总匝数也不同，两者之间的换算关系为：

$$N_{strand} = \frac{2N_{phase}}{n_{sys} \cdot n_{physical}} \quad (5-2)$$

其中  $N_{phase}$  为每相绕组总匝数，因为一匝绕组必然对应于一个流入的 physical region 和一个流出的，所以将其乘以 2，考虑模型对称数  $n_{sys}$  和每个绕组包含的 physical region 数可得每个 physical region 对应的绕组匝数  $N_{strand}$ 。

### 5.3.3. solid.txt

粗导体单元信息。粗导体是指考虑其中内部涡流反应的导体单元，它只与两端电

压关联，分别为 V1 和 V2 如图 3-19 所示。其格式为：

**粗导体单元总数**

**粗导体 1 关联 Physical region 编号, Va 在电路中的编号, Vb 在电路中编号**  
**电导率 (10<sup>6</sup>S/m) , 粗导体方向 (1.0 为正, -1.0 为负) , 初始电流, 并联支路数**  
**粗导体 2 关联 Physical region 编号, Va 在电路中的编号, Vb 在电路中编号**  
**电导率 (10<sup>6</sup>S/m) , 粗导体方向 (1.0 为正, -1.0 为负) , 初始电流, 并联支路数**

。 。 。



图 5-9 solid.txt

### 5.3.4. wind\_solid.txt

保存粗导体绕组信息。这个文件主要用于指定粗导体组成的绕组，便于计算磁链，设置初始电流。#winding\_solid 中的内容共同决定了这个 txt 文件，具体格式为：

**绕组总数**

**绕组 1 包含 physical region 的总数, 绕组 1 的名称**  
**绕组 1 包含 physical region 编号, 绕组 1 包含 physical region 编号。 。 。 。**  
**绕组 2 包含 physical region 的总数, 绕组 2 的名称**  
**绕组 2 包含 physical region 编号, 绕组 2 包含 physical region 编号。 。 。 。**

。 。 。 。



图 5-10 wind\_solid.txt

### 5.3.5. wind\_stranded.txt

保存细导绕组信息。这个文件主要用于指定细导线组成的绕组，便于计算磁链，设置初始电流。#winding\_stranded 中的内容共同决定了这个 txt 文件，具体格式为：

**绕组总数**

**绕组 1 包含 physical region 的总数, 绕组 1 的名称**  
**绕组 1 包含 physical region 编号, 绕组 1 包含 physical region 编号。 。 。 。**  
**绕组 2 包含 physical region 的总数, 绕组 2 的名称**  
**绕组 2 包含 physical region 编号, 绕组 2 包含 physical region 编号。 。 。 。**

。 。 。 。

```
wind_stranded.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
3
4      windA
5      10      11      13
4      windB
2      3       4       8
4      windC
6      7       9       12
```

图 5-11 wind\_stranded.txt

### 5.3.6. Cur\_S.txt

保存电流源信息，电流源电路示意图如图 3-20 所示。对应 Cur\_S 中文件格式为：

**电流源总数**

V1 在电路中对对应自由度编号， V2 在电路中对对应自由度编号

从 1 流向 2 的电流 Current

V1 在电路中对对应自由度编号， V2 在电路中对对应自由度编号

从 1 流向 2 的电流 Current

。。。

Cur\_S 中保存的为直流电流，如果没有下面的 CS\_input 文件，电流源将一直保持直流输出。

```
Cur_S.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
4
25      1
0
25      5
0
25      9
0
25      26
0
```

图 5-12 Cur\_S.txt

### 5.3.7. CS\_input.txt

保存每步电流源输出电流，用于交变电流输入。对应格式为：

**计算总步数， 交变电流源总数**

交变电源 1 编号， 交变电源 2 编号， 。。。

第一步交变电源 1 电流， 第一步交变电源 2 电流， 。。。

第二步交变电源 1 电流， 第二步交变电源 2 电流， 。。。

。。。

。。。

这里交变电源的编号对应于 Cur\_S.txt 中电流源的序号。

```

CS_input.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
120      3
1         2         3
          -4.7583302491977      -13      17.7583302491977
          -3.82240992809516      -13.6625513829677      17.4849613110629
          -2.87601264707217      -14.2876546622671      17.1636673093392
          -1.92173241529273      -14.8735964732598      16.7953288885525
          -0.962184848540968      -15.4187707901704      16.3809556387113
          0      -15.9216833280907      15.9216833280907
    
```

图 5-13 CS\_input.txt

### 5.3.8. Vot\_S.txt

保存电压源信息，电压源对应的电路示意图如图 3-21 所示。其中格式为：

**电压源总数**

V1 在电路中编号，V2 在电路中编号，I12 在电路中编号

第一个电源电压 (V1 相对于 V2 的电压)

V1 在电路中编号，V2 在电路中编号，I12 在电路中编号

第二个电源电压 (V1 相对于 V2 的电压)

。。。。以此类推

和 Cur\_S.txt 一样，Vot\_S.txt 中保存的是直流电压，如希望电压随步数变化，则需要和下面的 VS\_input.txt 配合使用。

### 5.3.9. Vs\_input.txt

用于瞬态输入电压，随步数更新 Vot\_S.txt 的内容。具体格式为：

**步数，需要实时更新电压源的总个数**

交变电压源 1 编号，交变电压源 2 编号，。。。

第一步交变电压源 1 电压，第一步交变电源 2 电压，。。。

第二步交变电源 1 电压，第二步交变电源 2 电压，。。。

。。。

。。。

这里交变电压源的编号对应于 Vot\_S.txt 中电压源的序号。

### 5.3.10. Res.txt

保存电阻单元信息，电阻电路图如图 3-22 所示。Res 中文件的格式为：

**电阻总个数**

V1 在电路中编号，V2 在电路中编号

Res (Ω)

### 5.3.11. Leak.txt

保存电感单元信息，对应电路图如图 3-22 所示，文件格式为：

**漏感总数**

V1 在电路中编号，V2 在电路中编号，I12 在电路中编号。

Ls 的值 (H)，初始电流 (A)

V1 在电路中编号，V2 在电路中编号，I12 在电路中编号。

Ls 的值 (H)，初始电流 (A)

。。。。

为防止出现 Bug，上面的 20 个 txt 文件在任何一个模型计算中都要存在，尽管有些模型可能不需要其中一部分文件。其中不要的文件在第一行输入 0 0 即可防止 bug 出现。

## 6. 瞬态场计算中间过程无后缀文件说明

下面对图 3-29 中的无后缀文件做一定的说明。其中有些文件是可以直接用记事

本打开的，有些则是 Fortran 的 unformatted，只能由 Fortran 读取。

## 6.1. 初始化时生成的无后缀文件

### (1) Area

保存了各个 physical surface 的面积。

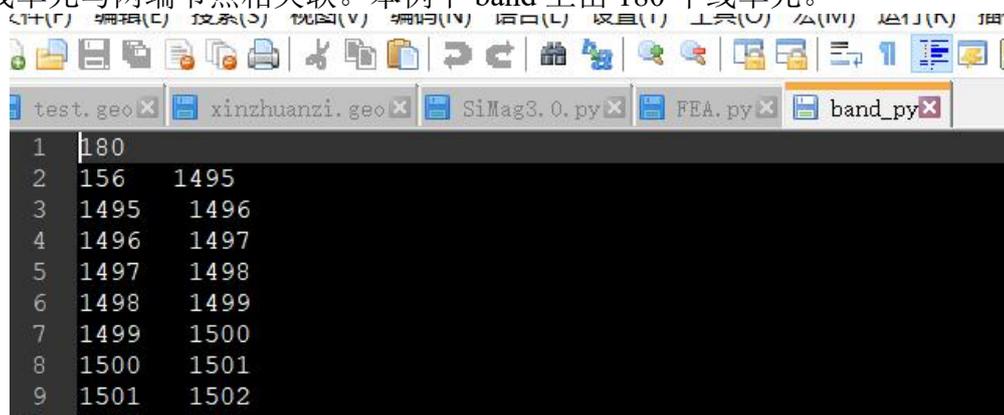
```

1      19
2      1077.686497726415000
3      12.500000000000010
4      32.499999999999950
5      12.499999999999990
6      32.500000000000010
7      32.499999999999990
8      12.499999999999980
    
```

图 6-1 Area 的主要内容

### (2) band\_py

这个文件中保存了设置名为 band 的 physical curve 上的所有线单元的节点编号。一个线单元与两端节点相关联。本例中 band 上由 180 个线单元。



```

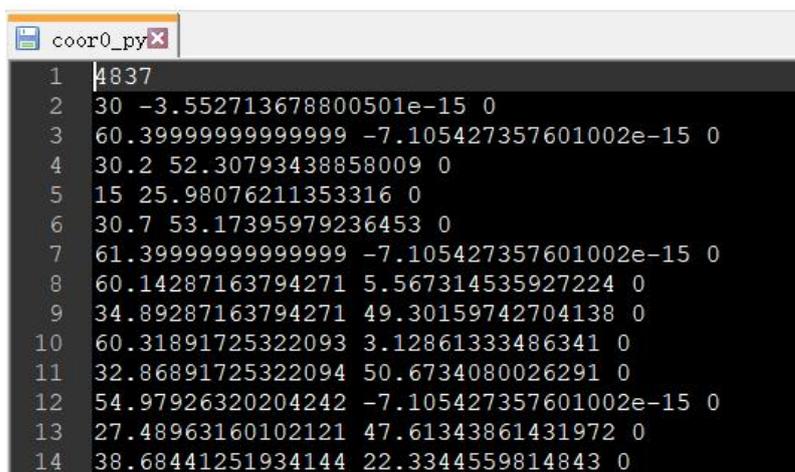
1      180
2      156  1495
3      1495  1496
4      1496  1497
5      1497  1498
6      1498  1499
7      1499  1500
8      1500  1501
9      1501  1502
    
```

图 6-2 band\_py 的主要内容

### (3) coor0\_py

几何模型节点总数  
x 坐标, y 坐标, z 坐标

。 。 。



```

1      4837
2      30 -3.552713678800501e-15 0
3      60.399999999999999 -7.105427357601002e-15 0
4      30.2 52.30793438858009 0
5      15 25.98076211353316 0
6      30.7 53.17395979236453 0
7      61.399999999999999 -7.105427357601002e-15 0
8      60.14287163794271 5.567314535927224 0
9      34.89287163794271 49.30159742704138 0
10     60.31891725322093 3.12861333486341 0
11     32.86891725322094 50.6734080026291 0
12     54.97926320204242 -7.105427357601002e-15 0
13     27.48963160102121 47.61343861431972 0
14     38.68441251934144 22.3344559814843 0
    
```

图 6-3 coor0\_py

### (4) id0\_py

节点规格数文件，-1 表示该点在第一类边界上，1 表示该节点是自由节点。

```

1 4837
2 1 -1
3 2 1
4 3 1
5 4 -1
6 5 1
7 6 1
8 7 1
9 8 1
10 9 1
11 10 1
12 11 1
13 12 1
14 13 1
15 14 1
    
```

图 6-4 id0\_py

**(5) Disp0\_py**

节点位移约束。当这个节点的规格数为 1 时，该值设为 0，当规格数为-1 时，该值表示给定位移。

```

1 4837
2 1 0.0
3 2 0.0
4 3 0.0
5 4 0.0
6 5 0.0
7 6 0.0
    
```

图 6-5 Disp0\_py

每个节点施加强制边界的值，默认是 0

**(6) elem0\_py**

这个文件保存了 gmsh 生成的所有三角形网格信息。第一行，9102 表示三角形单元总个数，第二个 9538 是 gmsh 生成的所有单元个数（三角，四边形，线单元），和 test.msh 中一致。

然后就是每个三角单元信息

节点 1 编号，节点 2 编号，节点 3 编号，单元材料编号（Physical region 号）

。 。 。 。

```

1 9102 9538
2 165 166 1858 1
3 166 167 1858 1
4 162 161 1854 1
5 170 162 1854 1
6 168 169 1856 1
7 163 164 1853 1
8 170 161 162 1
    
```

图 6-6 elem0\_py

当所有三角单元信息输出完毕后，接着的是四边形单元：

一共 180 个四边形的单元。

```

180
156 158 1674 1495 1
1495 1674 1675 1496 1
1496 1675 1676 1497 1
1497 1676 1677 1498 1
1498 1677 1678 1499 1
1499 1678 1679 1500 1

```

图 6-7 elem0\_py 中保存的气隙四边形网格

气隙分三层，中间一层采用四边形的单元剖分，主要目的是为了实现任意角度旋转。注意在剖分的时候需要将中间层剖成四边形，但是在实际计算时会根据旋转角，每个四边形单元会被转换成两个三角形单元。转换后的新单元会附加在原有的三角单元后面。

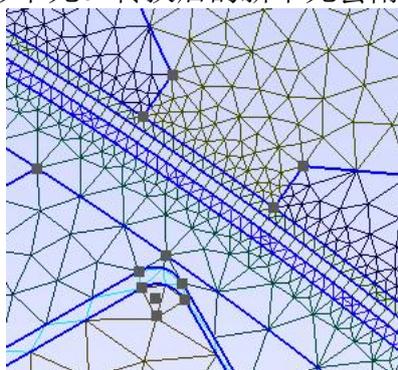


图 6-8 气隙处网格剖分

**(7) coorint, dispint, idint, elemint, id1**

四个几何模型文件的 unformatted 的格式。直接由上面四个\_py 文件转化而来，不包含电路，边界等信息。之所以采用这种格式，不是为了加密，而是采用这种格式所占空间最小，存取速度最快。

**(8) Elem\_B**

由 Bregion.txt 转化而来，其中保存了所有需要计算磁密的网格信息。由于我们前面设置了求解 out\_air (对应编号为: 18) 这个区域的磁密，这里得到这个区域共有 402 个网格，计算磁密的坐标系类型为圆柱坐标 (所以 402 之后为 2)。文件中给出了每个网格关联的节点编号和物理域编号。

网格关关节点 1, 网格关关节点 2, 网格关关节点 3, 网格物理域编号  
 . . .

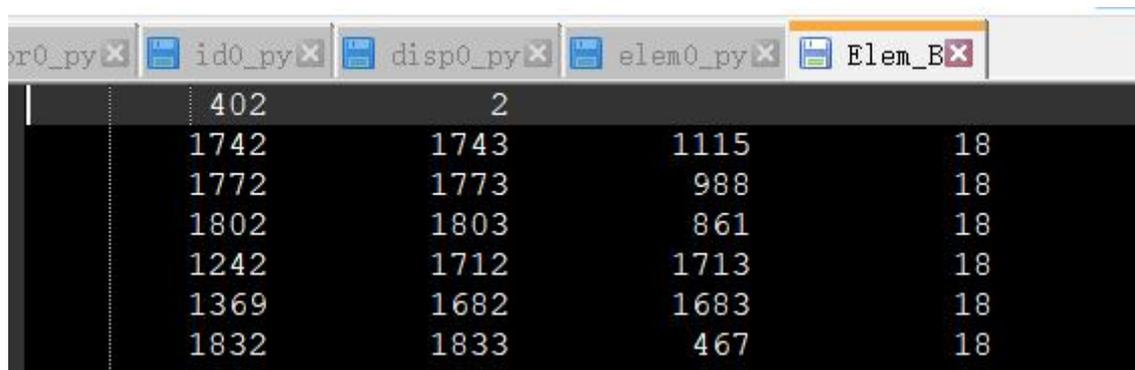


图 6-9 Elem\_B

**(9) Elem\_fdv**

由 fdvregion.txt 转化而来，其中保存了需要保存磁导率的网格信息。如果没有网格需要冻结磁导率。则该文件中第一个数字为 0。

网格关关节点 1, 网格关关节点 2, 网格关关节点 3, 网格物理域编号, 网格编号

1	5954	1				
2	199	8	1868	16	53	
3	7	200	1867	16	54	
4	199	1868	1939	16	55	
5	1867	200	1940	16	56	
6	282	281	1915	16	57	
7	414	413	1916	16	58	

图 6-10 Elem\_fdv

## 6.2. 计算过程中生成的无后缀文件

除了上述初始化时生成的无后缀文件，在程序计算过程中还会生成一些，如图 6-11 所示，下面作简要说明。



图 6-11 所有中间过程中无后缀文件

(10) Coor0, id0, elem0, disp0 文件

这个是有限元程序计算中的标准文件。

(11) plotno



图 6-12 起始步数和结束步数

(12) Time

计算时间文件，控制进程。

(13) Unod

保存上步计算值和非线性迭代上步计算值

(14) Stop

瞬态计算结束之后出现的文件，用于指示计算结束。

(15) FLD\_B

计算得到每个网格在某个转子位置时的磁密，如图 6-13 所示。具体操作是点击图 6-14 中的结果显示按钮，会将根据第\*步的 Uout.\*文件计算磁密和磁位，然后在融合到\*.pos 文件中作为 gmesh 显示的输入。

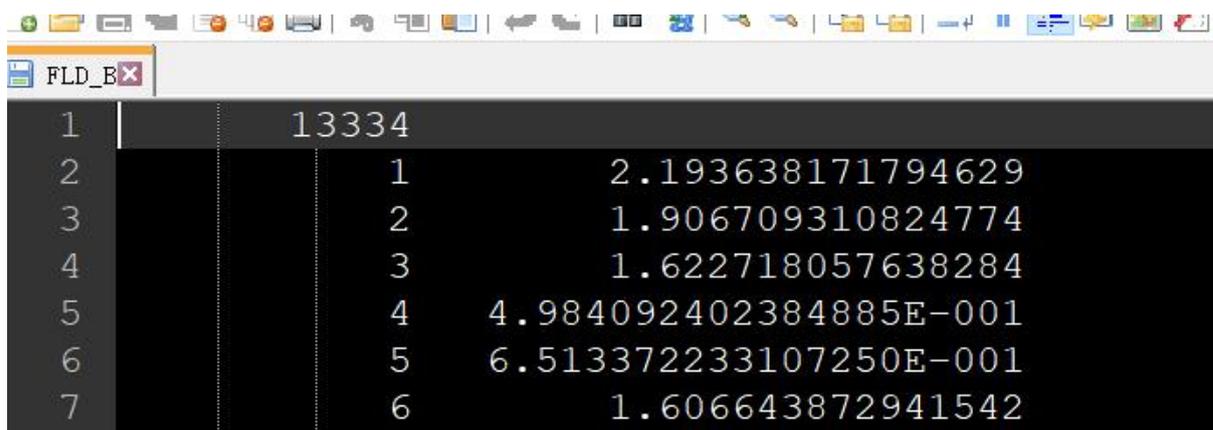


图 6-13 FLD\_B 中内容

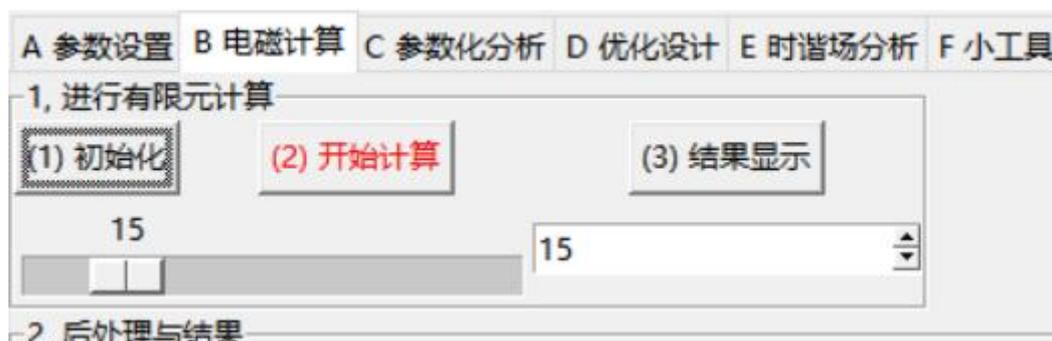


图 6-14 结果显示某步的磁密与磁力线

(16) displace

计算得到每个节点在某个转子位置时的磁位，如图 6-13 所示。同样在点击 (3) 结果显示时被融入了 gmsh 读取的结果文件\*.pos 中。

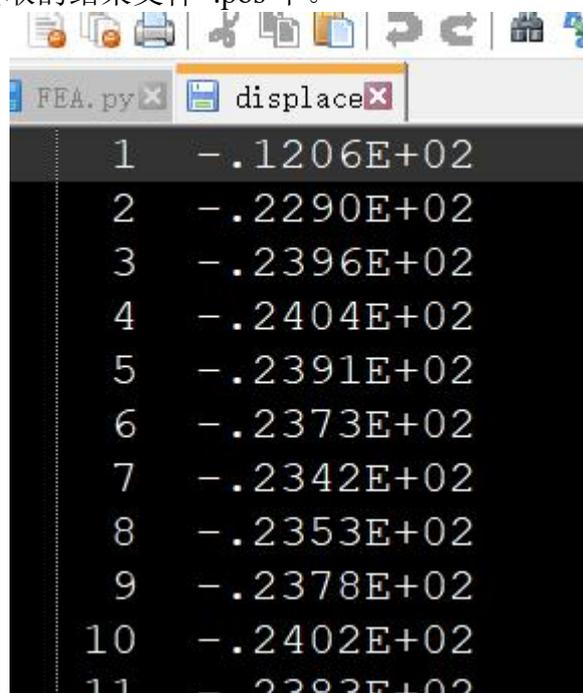


图 6-15 磁位保存

## 7. 瞬态场结果文件说明

计算生成的结果文件如图 7-1 所示。下面对各部分分别说明：

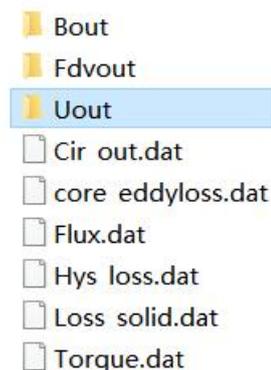


图 7-1 结果文件

(1) Bout 文件夹

里面包含了 120 步瞬态有限元计算得到的磁密，当就采用圆柱坐标系时，得到的六个数据的意义如下所式：

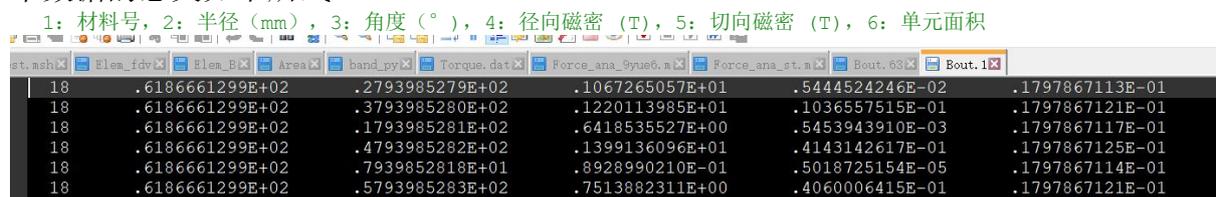


图 7-2 Out\_air 上每个网格磁密

每个网格的角度并不是线性递增的，使用时只需要要通过一个插值即可得到气隙磁密随转子位置的变化关系。

(2) Fdvout 文件夹

保存每步的冻结磁导率。每行内容依次表示，单元编号，v11，v12，

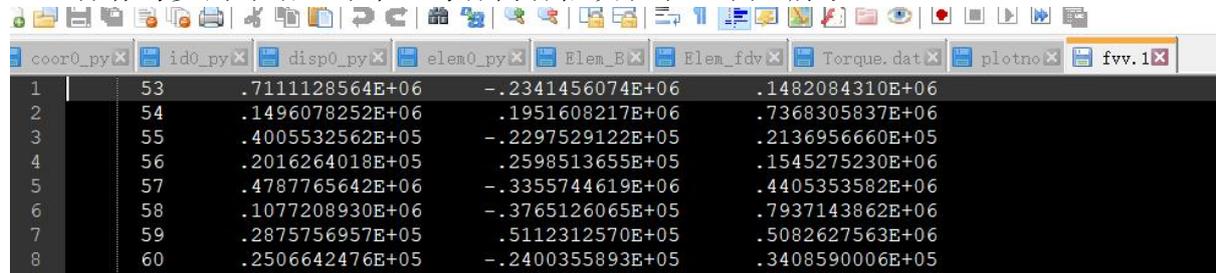


图 7-3 fvv.1 中当保存 FDRTM (冻结增量张量磁阻率) 时内容

(3) Uout 文件夹

保存每步每个节点的磁位值。这些数据采用 unformatted 格式是为了提高存取速度。

(4) Cir\_out.dat

26 个新增电路自由度每步的计算结果。本例中，如图 3-17 所示，三相反电势可以通过

(5) core\_eddyloss.dat

铁耗中的涡流损耗计算瞬时值，采用文献[6]中的动态涡流损耗法计算。

(6) Hys\_loss.dat

铁耗中的磁滞损耗计算瞬时值，采用文献[6]中的动态磁滞损耗法计算（和 Maxwell 一样，未考虑直流偏磁影响）。

(7) Flux.dat

对应与 winding.txt 中的三个绕组磁链。

(8) Loss\_solid.dat

计算所有粗导体中的涡流损耗，本例中对应于永磁体中的涡流损耗(二维方法)。这

个也可用于发卡绕组导条涡流损耗计算。

#### (9) Torque.dat

转子转矩。采用 inner\_air 和 out\_air 两层气隙磁密进行转矩计算，计算原理参考[4]。

## 8. 时谐场计算模块

为了进行频域小信号分析，我们将线性场-路耦合时谐场计算模块也进行了集成到软件界面中，如图 8-1 所示。

进行频域小信号分析的前提是先进行了正弦电流供电的静磁场计算，且已经生成了 \*.msh 文件和 FDP 文件夹中的冻结磁导率。如果仅进行线性时谐场分析而不使用冻结增量张量磁阻率法则无需 FDP 文件夹中内容。

### 8.1. 时谐场计算参数设置

相关程序保存在了 tutorial\_3.0\IPM\_THFEA\_skew1 中。

步骤(1): 首先在完成正弦电流供电仿真的前提下，确保当前工作文件夹中存在.msh 文件和 Fdvout 文件夹，这时候点击“1-(1)新建/打开 STHFEA”按钮，如果当前文件夹中不存在 STHFEA 文件夹，则会新建一个，如果有则直接打开这个文件夹。这个文件夹用于保存所有进行时谐场分析的文件。对应 FEA.py 中的 STHFEA\_ini()函数。

步骤(2): 点击“1-(2)更新 msh 和 FDP 文件”则会把瞬态场计算的\*.msh 文件复制到 STHFEA 文件夹中，相当于把瞬态场的几何模型文件\*.msh 复制到 STHFEA 用于时谐场分析。并将 Fdvout 文件夹中的冻结磁导率复制到 STHFEA/FDP 文件夹。对应于 FEA.py 中的 STHFEA\_update()函数。

步骤(3): 点击“1-(3)初始化 TH2d.xlsx”,如果文件夹中存在\*\_TH2d.xlsx 文件，则把这个文件复制成\*\_TH2d\_old.xlsx 文件，新建一个空的\*\_TH2d.xlsx 文件，防止误操作删除文件。如果文件夹中不存在该文件，则只会新建一个空的模板。对应 Ini\_param\_TH.py 中的 initialize()函数。

步骤(4): 点击“1-(4)打开 TH2d.xlsx”,用于打开该文件。对应 Ini\_param\_TH.py 中的 open()函数。

步骤(5): 点击“1-(5)将 TH2d.xlsx 中内容转化为 txt 文件”，将 TH2d.xlsx 中内容转化为各种 txt 文件。



图 8-1 时谐场分析界面

下面分别对 Excel 文件和 txt 文件分别说明。其中 Excel 文件大部分内容和瞬态场中

相同，一些个别的差别也可以通过提示理解，如图 8-2 所示。下面主要说明两个部分，所谓的永磁电机频域小信号分析就是在转子位于不同位置时，在局部线性化的模型上输入不同频率的谐波电压激励，研究对应的响应特性以实现以谐波电压为输入的谐波效应快速算法。因此，这里的#position 里保存的就是进行频域小信号分析的转子位置，它需要与保存的冻结磁导率位置一致，#Frequency 保存的就是扫描频率。此外在不同转子位置输入的电压激励如图 8-2 (b) 所示。#VS\_input 中的内容与#Vot\_S 中的内容按次序一一对应。这里 va, vb, vc 是任意定义的标签，后面#VS\_input 中依次为 va 的实部、va 的虚部、vb 的实部、vb 的虚部、vc 的实部和 vc 的虚部。这里面的 VSA.R、VSA.I 等标签只是起到标识作用。

	A	B	C	D	E
1	#problem type				
2	2DTHFEA_skew		分段斜极设		
3	#skew	Skew_angle	置，同瞬态场		
4		0			
5	#end skew				
6	#physical	Label	Number		
7		air	1		
8		BP1	2		
9		BP2	3		
10		BP3	4		
11		AN1	5		
12		CN1	6	物理域	
13		CN2	7		
14		BP4	8		
15		CN3	9		
16		AP1	10		
17		AP2	11		
18		CN4	12		
19		AP3	13		
20		PM	14		
21		SST	15		
22		rotor	16		
23		inner_air	17		
24		outer_air	18		
25		mid_air	19		
26	\$end physical region				
27	#units	units			
28		mm	单位	模型对称	
29	#model	Symmetry num	Axial_length(mm)	数，轴长	
30		6	90		

31	#sidelin	Isexist?	Master angle(°)	Slave an	Linktype
32		Yes	0	60	-1
33	#Ini_pos	Rotor initial mechanical position(°)			
34		0			
35	#gap mes	Mesh number	Total mechanical angle(°)		
36		180	60		
37	#isrotat	#Is rotation?			
38		Yes	转子旋转步数		
39	#Positio	Start Positi	Position step	(Total step number	
40		0	1	20	
41	#Bregion	Coordinate tRegion Labels...			
42		2 outer_air		物理域输出磁密	
43	#Frequen	Sweep Frequency(Hz)			
44		4000			
45		8000			
46		12000			
47		16000			
48		20000			
49	#end Frequency				

(a) Basical parameters 表单中内容

#Vot_S	name	V1	V2	I12		
	va	1	26	27		
	vb	5	26	28		
	vc	9	26	29		
#end Vot_S						
#VS_input	Total st	Label...				
	20	VSA. R	VSA. I	VSB. R	VSB. I	VSC. R
	1	-12.4005	0	-26.7341	0	39.13459
	2	-10.3932	0	-28.2546	0	38.64785
	3	-8.35744	0	-29.6977	0	38.05518

(b) Circuit 表单中电压源输入内容

图 8-2 \*\_TH2d.xlsx 内容

下面对时谐场计算中生成的 txt 文件进行说明。

### 8.1.1. LPnode.txt

LPnode.txt 保存了节点规格数文件。

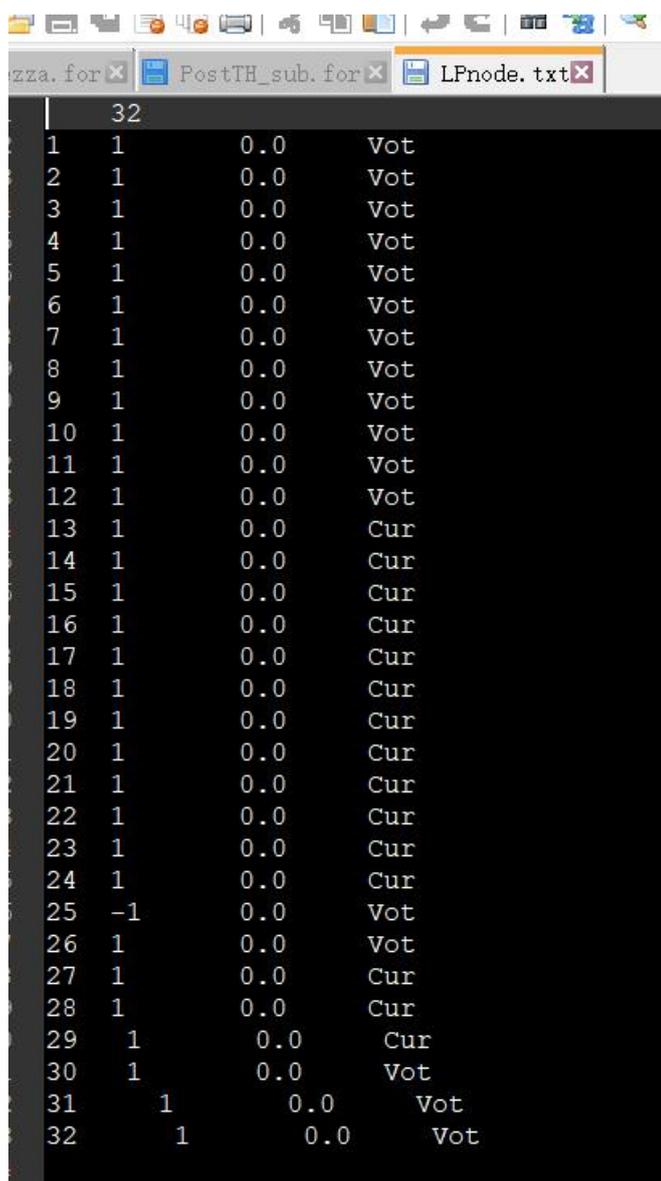


图 8-3 节点规格数文件

### 8.1.2. Units.txt

几何模型的单位。

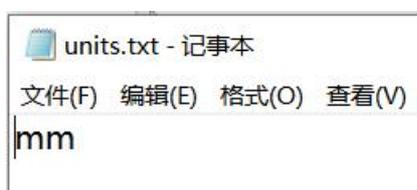


图 8-4 单位信息

### 8.1.3. model.txt

模型对称数，轴长（单位：m）。



图 8-5 几何模型信息

注意此处轴长的单位为 m，而在瞬态场中，轴长的单位为 mm。

#### 8.1.4 VP.txt

相当于电路中给定电位的值。这个功能是老版本软件的功能，在这里保留但不起作用，置 0 即可。

nvp (总数)

$N_{cir}$  (节点编号),  $U_r$  (电压实部),  $U_i$  (电压虚部)

o o o

o o o

#### 8.1.5 material\_TH.txt

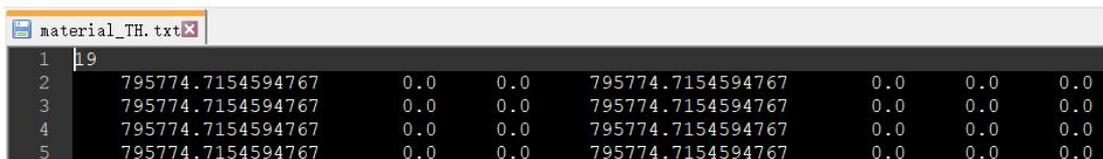


图 8-6 material\_TH.txt

$v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}, \sigma, f_r, f_i$

四个张量磁阻率，电导率，电流密度实部，电流密度虚部

对应于 a1et3.for 中保存 8 个参数，分别为： $v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}, \sigma, f_r, f_i, \omega$  (角频率)

也就是比 material\_TH 中多了一个角频率参数。

#### 8.1.6 Solid.txt

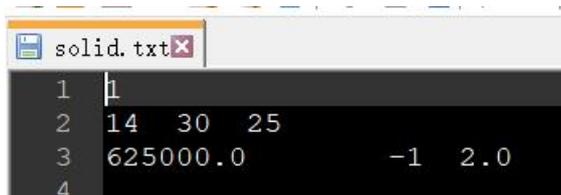


图 8-7 solid.txt

粗导体个数

关联物理域编号，流入节点电压自由度编号，流出节点电压自由度编号

电导率，电流方向（流出为+1，流入为-1），并联支路数。

#### 8.1.7 Bregion.txt



示例：

1 (需要保存磁密区域的总数) 2 (磁密的坐标类型，1：直角系，2：圆柱系)

18 (需要保存磁密第一个区域的编号)

... (需要保存磁密第二个区域的编号，如果有)

### 8.1.8. coef\_loss.txt



示例:

设置硅钢片铁耗系数。具体格式为:

**计算铁耗的区域总数**

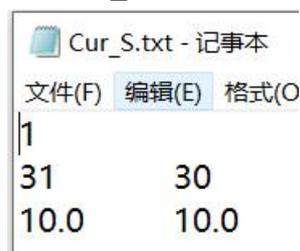
**该区域 Physical region 编号, 涡流损耗系数, 磁滞损耗系数**

**该区域 Physical region 编号, 涡流损耗系数, 磁滞损耗系数**

。。。。

如果不需要计算铁耗, 将该文件第一行设置为 0 即可。目前程序中采用的铁耗计算模型与 Ansoft Maxwell 中一致, 后期可以根据需要拓展。

### 8.1.9. Cur\_S.txt



**电流源总数**

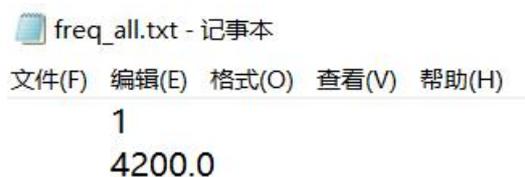
**V1 在电路中对应自由度编号, V2 在电路中对应自由度编号**

**从 1 流向 2 的电流 Current (实部), 从 1 流向 2 的电流 Current (虚部)**

**V1 在电路中对应自由度编号, V2 在电路中对应自由度编号**

**从 1 流向 2 的电流 Current (实部), 从 1 流向 2 的电流 Current (虚部)**

### 8.1.10. Freq\_all.txt



**频率总数**

**第 1 个频率点**

**第 2 个频率点**

。。。。

### 8.1.11. Ini\_pos.txt

**转子初始位置**

```

ini_pos.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮
0
    
```

### 8.1.12. Leak.txt

```

Leak.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
1
32      25
1.0e-7
    
```

漏感总数

V1 在电路中编号, V2 在电路中编号。

Ls 的值 (H)

V1 在电路中编号, V2 在电路中编号。

Ls 的值 (H)

。。。。

为防止出现 Bug, 上面的 20 各 txt 文件在任何一个模型计算中都要存在, 尽管有些模型可能不需要其中一部分文件。其中不要的文件在第一行输入 0 0 即可防止 bug 出现。与瞬态场相比, 时谐场的 leak 文件不需要初始电流, 电路如图 8-8 所示。

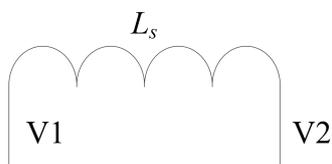


图 8-8 电感示意图

### 8.1.13. Mesh.txt

气隙网格剖分机械角度。

```

mesh.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
0.16666666666666667d0
    
```

### 8.1.14. Model.txt

模型对称数, 轴长 (单位是 m, 注意与瞬态场区别)

```

model.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
6.0      0.09
    
```

### 8.1.15. position.txt

转子旋转位置总数

```
position.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
120
0
1
2
3
4
5
```

### 8.1.16. Res.txt

```
Res.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
1
31      32
0.1
```

保存电阻单元信息，电阻电路图如图 3-22 所示。Res 中文件的格式为：

**电阻总个数**

V1 在电路中编号，V2 在电路中编号

Res ( $\Omega$ )

### 8.1.17. Rot\_judge.txt

```
Rot_judge.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O)
1
```

转子是否旋转判断。

### 8.1.18. Sidelink.txt

```
sidelink.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
1
0.0d0    60.0d0    -1
```

示例：

```
1
0.0d0 60.0d0 -1
```

专用于旋转电机中的旋转周期对称条件，具体格式为：

1 or 0 (1: 表示存在旋转对称边界，0: 不存在旋转对称边界)

Master 边与 x 轴夹角，Slave 边与 x 轴夹角，1 或 -1

1 表示旋转周期对称条件，-1 表示反周期旋转对称边界。注意这里 1 或 -1 必须写成

整数。

### 8.1.19. Stranded.txt

格式同

```

stranded.txt
1 12
2 5 1 2 13
3 0.1 29.0 -1.0 0.0 2.0
4 10 2 3 14
5 0.1 29.0 1.0 0.0 2.0
6 11 3 4 15
7 0.1 29.0 1.0 0.0 2.0
8 13 4 25 16
9 0.1 29.0 1.0 0.0 2.0
10 2 5 6 17
11 0.1 29.0 1.0 0.0 2.0
12 3 6 7 18
    
```

细导线单元总数

粗导体 1 关联 physical region 编号, V1 在电路中自由度编号, V2 在电路中自由度编号, I12 在电路中自由度编号

绕组电阻, 绕组匝数, 绕组方向 (1.0 为正, -1.0 为负), 初始电流, 并联支路数

粗导体 2 关联 physical region 编号, V1 在电路中自由度编号, V2 在电路中自由度编号, I12 在电路中自由度编号

绕组电阻, 绕组匝数, 绕组方向 (1.0 为正, -1.0 为负), 初始电流, 并联支路数

### 8.1.20. Solid.txt

```

solid.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
1
14 25 26
0.625 1 0 1
    
```

### 8.1.21. Vot\_S.txt

```

Vot_S.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
3
1 26 27
5 26 28
9 26 29
    
```

电压源总数

V1 在电路中编号, V2 在电路中编号, I12 在电路中编号

V1 在电路中编号, V2 在电路中编号, I12 在电路中编号

...

### 8.1.22. VS\_input.txt

这个和 Vot\_S.txt 配合使用的，里面保存每步，每个电压源 V1 相对于 V2 的电压的实部与虚部。

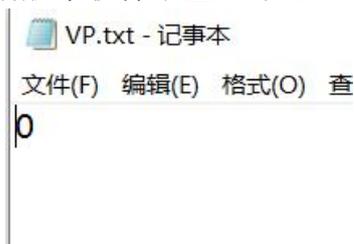


```

1  3
2  -10.3527618041008  0  -28.2842712474619  0  38.6370330515627  0
3
    
```

### 8.1.23. VP.txt

保存给定节点的电位值，在新版本软件中置 0 即可。



```

VP.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查
0
    
```

用于直接施加节点电压

### 8.1.24. Wind\_stranded.txt

功能和瞬态场相同。



```

wind_stranded.txt - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
3
4      windA
5      10      11      13
4      windB
2      3      4      8
4      windC
6      7      9      12
    
```

### 8.1.25. Wind\_solid.txt

功能和瞬态场相同。

## 8.2. 时谐场计算

点击“2-(1) 初始化”进行时谐场计算前的初始化工作，主要功能是将.msh 文件转化为进行时谐场计算所需的几何模型文件，对应于 THFEA.py 中的 Ini\_msh()函数。

点击“2-(2) 进行时谐场计算”，即可开始进行时谐场计算，对应于 THFEA.py 中的 run()函数。

计算结果文件保存在了 BTH 文件夹和 POST 文件夹。

BTH 文件夹中保存的是每步时谐场计算磁密输出。

1, 物理域编号, 2, 半径, 3, 角度, 4, 径向磁密实部, 5, 径向磁密虚部, 6, 切向磁密实部, 7, 切向磁密虚部, 8, 面积

`idregion,rav,theta,Br_r,Br_i,Bt_r,Bt_i,sdet`

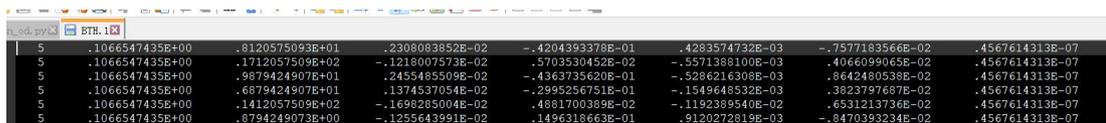


图 8-9 BTH.\*内容

POST 文件夹中保存了时谐场计算所有的输出文件。

### 8.3. dq 轴谐波电压快捷输入插件

根据图 4-17，通过静止 dq 变换，将 dq 谐波电压转化到 abc 坐标系的表达式为：

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{ah} \\ \mathbf{u}_{bh} \\ \mathbf{u}_{ch} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{dh} \\ \mathbf{u}_{qh} \\ \mathbf{u}_{oh} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dh} \angle 0^\circ \\ U_{qh} \angle 0^\circ \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} U_{dh} \cos \theta_e \angle 0^\circ - U_{qh} \sin \theta_e \angle 0^\circ \\ U_{dh} \cos(\theta_e - 2\pi/3) \angle 0^\circ - U_{qh} \sin(\theta_e - 2\pi/3) \angle 0^\circ \\ U_{dh} \cos(\theta_e + 2\pi/3) \angle 0^\circ - U_{qh} \sin(\theta_e + 2\pi/3) \angle 0^\circ \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} U_{dh} \cos \theta_e \sin(\omega_h t + 90^\circ) - U_{qh} \sin \theta_e \sin(\omega_h t + 90^\circ) \\ U_{dh} \cos(\theta_e - 2\pi/3) \sin(\omega_h t + 90^\circ) - U_{qh} \sin(\theta_e - 2\pi/3) \sin(\omega_h t + 90^\circ) \\ U_{dh} \cos(\theta_e + 2\pi/3) \sin(\omega_h t + 90^\circ) - U_{qh} \sin(\theta_e + 2\pi/3) \sin(\omega_h t + 90^\circ) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{8-1}$$

其中  $\mathbf{u}_{oh}$  为 0 序电压，在三相不接地系统里可以直接置 0。

对于不同的 dq 轴谐波电压都通过(8-1)计算，然后在#VS\_input 中修改。这样对于每次改变 d、q 电压都无需重复计算。

前提条件是模型已经搭建正确，最好通过一次计算进行了检验。然后点击“3-(1) 设置 dq 轴谐波电压”，对应于 Vh\_gen.py 中的 initial() 函数，此时的输入参数如图 8-10 所示。

关闭该 Excel 文件，点击“3-(2) dq 谐波电压转化为 txt”，则会在文件夹中生成对应的 Time0.txt, Position.txt, VS\_input.txt 等文件。

	A	B
1	D轴电压幅值Vdh:	40
2	D轴电压相位phidh:	0
3	Q轴电压幅值Vqh:	0
4	Q轴电压相位phiqh:	0
5	初始d轴超前A轴电角度thetai(°)	165
6	电机极对数p:	3
7	一个周期总点数:	120
8	计算总点数:	20

图 8-10 vdhq\_input.xlsx 中的输入内容

## 9. Python 脚本驱动功能

待更新。

## 10. 注意事项和常见错误

1. 把 simag 安装文件夹放在路径比较短的，比如直接 C 盘下，安装路径和工作文件夹里都尽量不要有中文。
2. 尽量单线程操作，用 simag 里的按钮打开 gmesh 几何模型，txt, Excel 等时，先保存关闭这些文件，再进行其它操作，当然先关闭文件再操作也不是所有文件都必须的，可以灵活处理，只要不卡死。
3. 在进行瞬态场计算时，如果不用冻结磁导率，请将#fdvregion 以及对应的 fdvregion.txt 中不设置任何区域，这样能够避免每步存储较大的 fv 数据。当然，如果需要进行频域小信号分析则，必须要设置#fdvregion 区域，并在 TH2d 中将这些区域的相对磁导率设置为 0，以表示这些区域使用静磁场冻结的增量磁导率。

U	Z
1 #fdvregion	type (1: FDRTM; 2 Region Labels...
2	1

4. 运行过程中关闭 360 等杀毒软件，否则计算速度会受到影响。
5. 运行 3.0 这个版本软件的电脑最好有固态硬盘，本软件运行时占内存不多，但是文件的读写较为频繁，工作路径建议放在固态硬盘中。
6. 在定义中间气隙层网格剖分时，geo 文件中：

这个命令是将某条线上均匀分部 91 个点，算上首尾的点，实际上只有剖分了 90 个线段。比如将 band 线设置剖分了 91 个点，实际在\*\_TS2d.xlsx 中 Mesh number 为 90，如下图所示。

7. Inner\_air, Outer\_air 和 Mid\_air 的位置注意不要搞错了，三个位置接近很容易选错。
8. Simag 里面目前没有叠压系数的设置，可直接改变轴长。

## 参考文献

- [1] 朱洒, 等, 二维电磁场—路耦合仿真软件的开发与应用, 高压电器, 57 (04): 125–133, 2021.
- [2] Sa Zhu, Wei Hua, and Bin Shi, Comparison of methods using different sources for computing PWM effects on permanent magnet Machines considering eddy current reaction, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 6, pp. 1–4, Jun. 2021.
- [3] <http://www.gmsh.info/>
- [4] 朱洒, 新型永磁电机损耗计算与多物理场分析[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [5] 朱洒, 二维瞬态电磁场路耦合仿真软件 SaMag1.0 使用说明书.doc
- [6] Sa Zhu, Ming Cheng, Jianning Dong, et al. Core Loss Analysis and Calculation of Stator Permanent-Magnet Machine Considering DC-Biased Magnetic Induction[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, 61(10): 5203-5212.
- [7] K. Yamazaki and Y. Seto, ‘Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition’, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 42, no. 4, pp. 1045–1052, Jul. 2006, doi: 10.1109/TIA.2006.876080.
- [8] S. Zhu, H. Wang, J. Zhang, Z. Lu, and M. Cheng, ‘Fast Calculation of Carrier Harmonic Loss in Permanent magnet of IPMSM under PWM VSI Supply over Entire Working Range’, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. PP, pp. 1–1, Feb. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2901299.
- [9] S. Zhu, J. Dong, Y. Li, and W. Hua, ‘Fast calculation of carrier harmonic iron losses caused by pulse width modulation in interior permanent magnet synchronous motors’, *IET Electric Power Applications*, vol. 14, Mar. 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0837.
- [10] S. Zhu and W. Hua, ‘Fast calculation of eddy current losses caused by pulse-width modulation in magnets of surface-mounted PM machines based on small-signal time-harmonic finite element analysis’, *IET Electric Power Applications*, vol. 14, Jul. 2020, doi: 10.1049/iet-epa.2020.0299.
- [11] 考虑 PWM 谐波损耗的车用扁线内嵌式永磁同步电机效率图简化工程计算