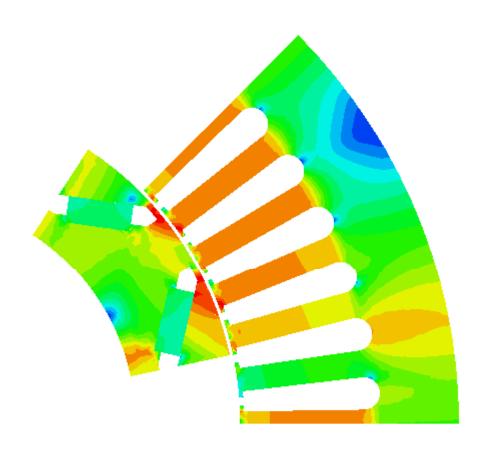


基于MAXWELL 2D 的永磁电机研究: 以丰田公司2004年推出的普锐斯混合动力 车用内置永磁驱动电机为例进行阐述





#### ★ 对研究对象电机的说明

- Ansoft公司推出的机电系统仿真软件包Maxwel2D是一款功能强大的电机仿真软件,本文档将详细阐述了Maxwel2D在电机稳态、暂态仿真中的应用。
- 本应用文档将以丰田公司2004年推出的普锐斯混合动力车用驱动电机为例进行阐述。该永磁电机为8极内置式转子磁路结构,定子为48槽,绕组为三相单层结构。由于该电机是对外公布的,我们可以获得电机的整套参数。同时在本应用文档中我们引用该电机在Oak Ridge 国家实验室的测试数据。

#### 注: 该应用实例并非与丰田公司合作完成





#### ▲ 参考文献:

- Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property, No-Load Back EMF, and Mechanical Losses,
  - J. S. Hsu, Ph.D., C. W. Ayers, C. L. Coomer, R. H. Wiles
  - Oak Ridge National Laboratory
- Report on Toyota/Prius Motor Design and manufacturing Assessment
  - J. S. Hsu, C. W. Ayers, C. L. Coomer
  - Oak Ridge National Laboratory
- Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report
  - C. W. Ayers, J. S. Hsu, L. D. Marlino, C. W. Miller, G. W. Ott, Jr., C. B. Oland
  - Oak Ridge National Laboratory



## ▲ 分析内容概述:

- ▲ 一般步骤
  - ▲ 创建3D模型
  - ▲ 改变3D模型的尺寸
  - ★ 指定电机所用材料的属性
  - ▲ 指定主/从边界条件
- ♣ 稳态分析
- ₩ 瞬态分析
- ★ 齿槽转矩求解



## ▲ 入门步骤

- ▲ 启动 Maxwell
  - 1. 启动Maxwell, 单击 Microsoft 的开始 按钮, 选择 Programs>Ansoft>Maxwell 12.
- ☆ 设置工具栏选项
  - ▲ 设置工具栏选项:
    - 注: 为与本例中的所列步骤保持一致,检查工具栏选项是否按如下设置: 选中菜单栏 *Tools > Options > Maxwell 2D Options*
    - 1. Maxwell 选项窗口:
      - 1. 左键单击 General Options 对话框
        - Use Wizards for data entry when creating new boundaries:
          ☑ Checked
        - Duplicate boundaries with geometry: 

          ☐ Checked
      - 2. 左键单击 OK 键
    - 2. 选中菜单项 Tools > Options > Modeler Options.
    - 3. 3D 模型选项窗口:
      - 1. 左键单击 Operation 对话框
        - Automatically cover closed polylines: ☑ Checked
      - 2. 左键单击 Drawing 对话框
        - ▲ Edit property of new primitives: ☑ Checked
      - 3. 左键单击 **OK** 键



#### ▲ 创建一个新工程

- ▲ 创建一个新工程:
  - 1. 在Maxwell窗口中, 左键单击 工具栏 图标, 或选中菜单栏 File > New.
  - 2. 右键单击工程名, 然后选择弹出的快捷菜单栏rename项, 改变工程名 为 *Prius*
  - 3. 选中菜单栏 Project > Insert Maxwell Design, 或单击图标 💵
  - 4. 右键单击 Maxwelldesign1,然后选择弹出的快捷菜单栏Rename项, 重命名为 *1\_Whole\_Motor*



- ▲ 设置模型单位
  - 选中菜单栏 3D Modeler > Units. 选择单位: mm (millimeters)

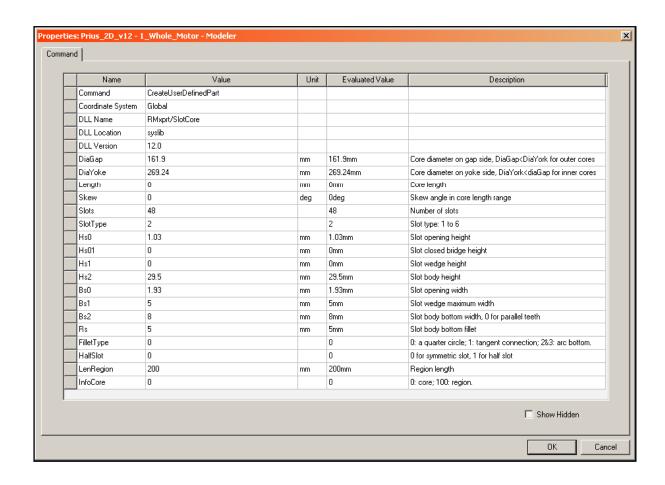


## ▲ 创建2D模型

▲ 电机所有主要部件均可由Maxwell中的User Defined Primitives来生成。

#### ▲ 创建电机的定子:

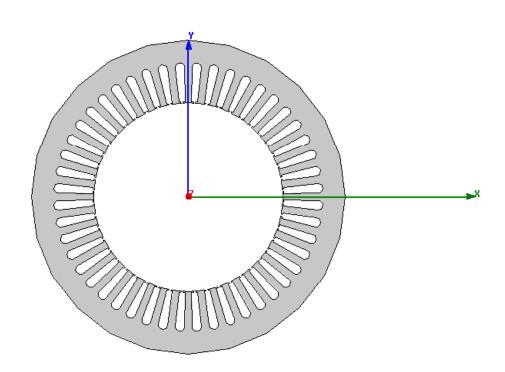
- ★ 使用一个用户预先定义的模型(UDP)来创建定子。
- 选中菜单栏 Draw > User Defined Primitive > Syslib > Rmxprt > SlotCore
- 采用下表所列数据来创建电机的定子





# ▲ 创建 2D 模型 (续)

- ▲ 右键单击在绘图窗口中刚刚创建的物体并重命名为 Stator
- 注: 稍后再指定材料属性

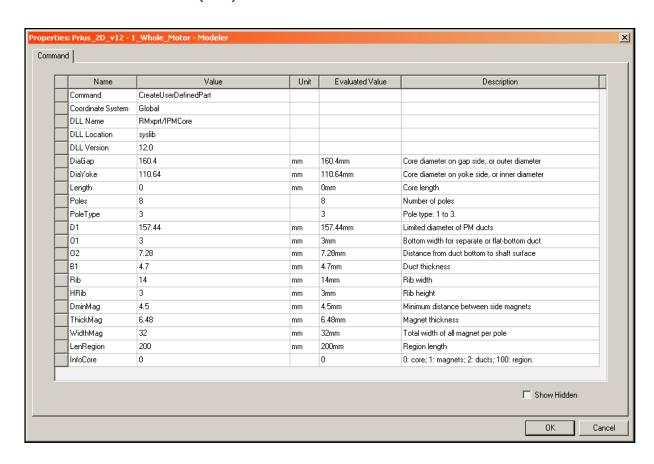


#### ▲ 创建电机的转子

- ★ 使用一个用户预先定义的模型来创建转子
- 选中菜单栏 Draw > User Defined Primitive > Syslib > Rmxprt > IPMCore
- 采用下表所给定的数据来创建转子



## ▲ 创建2D模型 (续)



▲ 右键单击在绘图窗口中刚刚创建的物体并重命名为 Rotor。

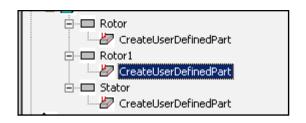
#### ▲ 创建电机永磁体

- 修改UDP参数,生成永磁体。可通过计算UDPs 来生成不同的拓扑结构。
- 选中转子,并使用 Ctrl+C, Ctrl+V 等复制、粘贴命令,生成一个新的物体 Rotor1

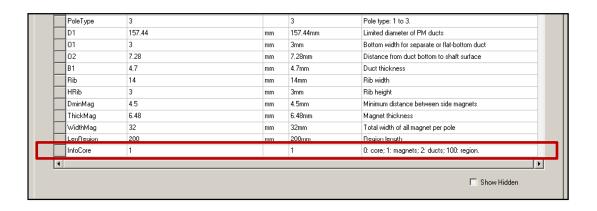


# ▲ 创建 2D模型 (续)

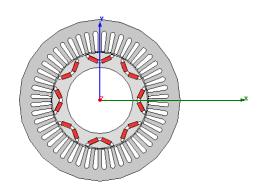
在模型树中, 左键双击 Rotor1 的 'CreateUserDefinedPart'并打开命令对话框



☀ 将 InfoCore 这一栏中的 0 (Core) 改为 1 (Magnets)



- \* 将物体的名称由 Rotor1 改为 Magnets。
- 将永磁体的颜色由默认色改为浅红色。

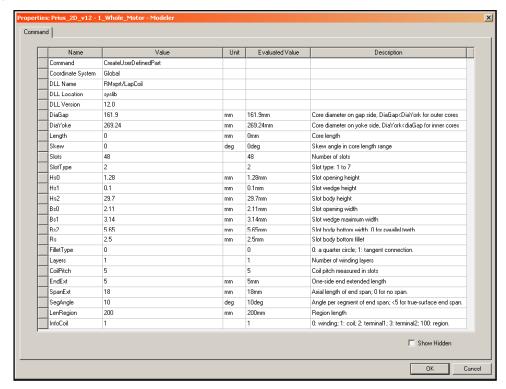




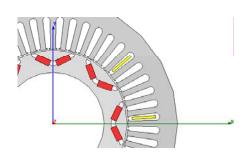
## ▲ 创建2D模型 (续)

#### ▲ 创建定子绕组

- 我们同样可使用预定义的模型来创建定子绕组。
- 选中菜单栏 Draw > User Defined Primitive > Syslib > Rmxprt > LapCoil
- ★ 使用下面所给出数据来创建定子绕组



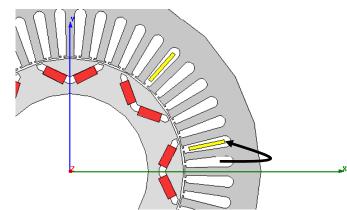
- 将材料的属性由 vacuum 更改为 Copper。
- 选中 *LapCoil1*并将其颜色改为 yellow。



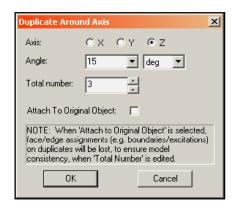


# ▲ 创建 2D模型 (续)





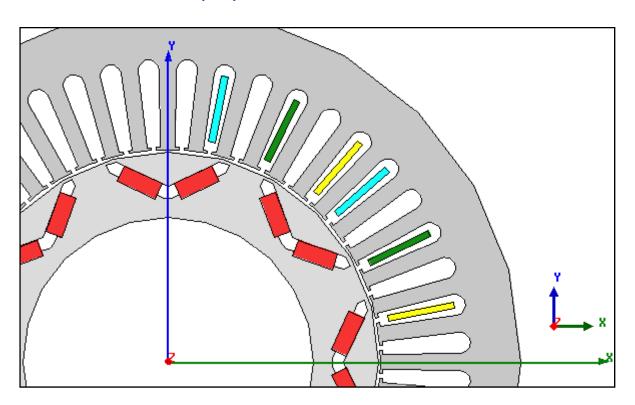
选中物体 *LapCoil1*,这个线圈为A相的第一个绕组. 现在我们复制这个绕组来生成B相和C相的第一个绕组。 右键单击并选中菜单栏 *Edit > Duplicate > Around Axis* 或使用工具栏图标 ::



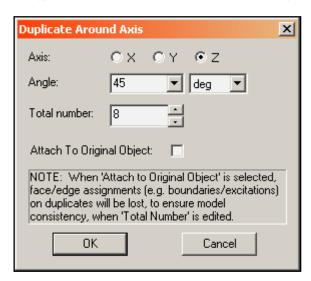
重命名 *LapCoil1\_1* 为 *PhaseC*,并更改其颜色为深绿色;重命名 *LapCoil1\_2* 为 *PhaseB*,并更改其颜色为淡蓝色;重命名 *Lapcoil1* 为 *PhaseA*.



## ▲ 创建 2D 模型 (续)



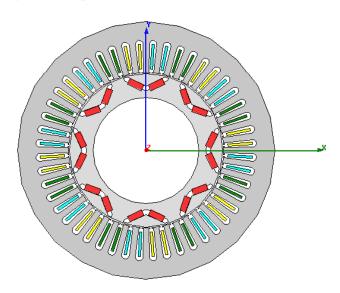
选中物体 *PhaseA*, *PhaseB* 及 *PhaseC*,右键单击并选中菜单栏 *Edit > Duplicate > Around Axis* 或使用工具栏图标 记 在Angle栏中输入 45 ,单位为degrees,在total number栏中输入8。这就生成了我们所需的所有绕组。



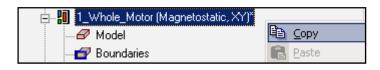


## ▲ 创建 2D 模型 (续)

我们创建的电机的几何模型如下图所示:



- 根据我们所用的求解器的不同及我们需要获得的电机的性能参数,有可能会增加新的物体(在设置剖分和运动属性时会用到)。
- 🧼 保存工程,右键单击 '**1\_Whole\_motor**',并选择 '*Copy*'。

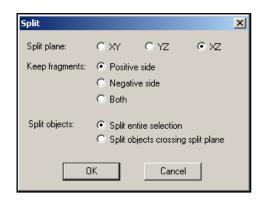


- ▲ 右键单击工程名并选择 'Paste', 更改所复制的工程名称为 2\_Partial\_motor.
- 我们可充分利用电机的拓扑结构来减小所仿真电机的尺寸。电机的极数为8,我们可只仿真电机的一个周期。这是可行的,因为电机的定子结构为:
  - 48 槽(48被8整除).
  - 三相定子绕组以45度为一周期分布.
- 从现在开始,我们将使用'**2\_Partial\_motor**'来进行仿真。我们同时还有一个电机整个区域的备份以备在其他的研究中使用。



## ▲ 减小2D模型的尺寸(续)

从模型树下选择所有物体 (或者你可使用 *ctrl-A* 命令)。 右键单击并选中菜单栏 *Edit > Boolean > Split* 或使用工具栏图标 . 选择 *XZ* plane 并选定 *positive* side。



- 注意: 在这些过程中,对话栏中会出现一些信息。这些信息提示我们一些物体由于 完全在所保留的模型之外而不被保存。

Axis:

OΚ



▼ deg ▼

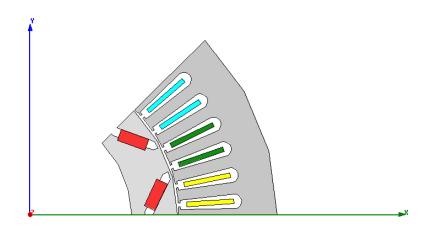
Cancel

被选中的物体继续进行操作,右键单击并选中 菜单栏 *Edit > Arrange > Rotate*或使用工具栏图标 □。选择沿Z轴方向旋转并输入 *45* deg。



## ▲ 减少 2D 模型的尺寸 (续)

▲ 所创建的2D 模型如下所示

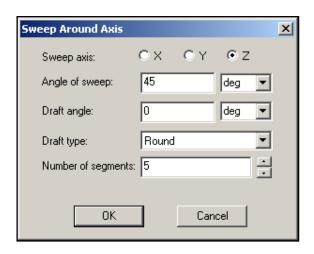


- 重命名 *PhaseA* 为 *PhaseA1*,重命名 *PhaseA\_7*为 *PhaseA2*,重命名*PhaseB*, *PhaseB\_7*, *PhaseC*及*PhaseC\_7*分别为 *PhaseB1*, *PhaseB2*, *PhaseC1*和 *PhaseC2*.
- 我们现在可以创建一个包围电机的区域。由于磁力线分布集中在电机内部,所以 我们不需要创建很大的区域。
- 选中菜单栏 Draw > Line
  - 1. 在坐标输入窗口,输入方体的位置
    - ▲ X: 0.0, Y: 0.0, Z: 0.0, 按 Enter 键输入
  - 2. 在坐标输入窗口,输入方体的相对尺寸
    - M dX: 200.0, dY: 0.0, dZ: 0.0, 按 Enter 键输入
  - 3. 左键单击 Enter两次 结束绘图

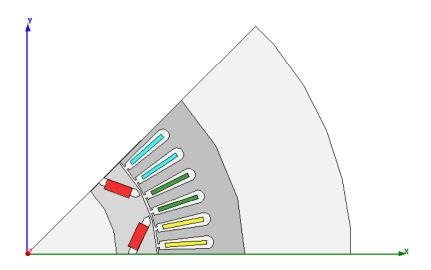


# ▲ 减小 2D 模型的尺寸 (续)

- 选择 Polyline1, 右键单击并选中菜单栏 Edit > Sweep > Around Axis.
- ▲ 参数按下面所列出的输入:



▲ 重命名区域 *Polyline1* 为 *Region*。确认我们所选用的材料为真空。同时,你可以通过增加区域的透明度来改变其渲染效果。

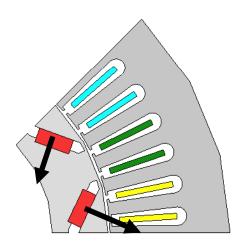




## ▲ 设置电机材料属性

#### ▲ 永磁材料特性.

- ▲ 丰田Prius混合动力车驱动电机所用永磁材料 (PMs) 是一种高强度的永磁体。
- 为定义永磁体磁化方向, 我们需要为单独的定义每一块永磁体。选择 *Magnets*. 右键单击并选中菜单栏 *Edit > Boolean > Separate Bodies*。重命名 *Magnets* 为 *PM1* 以及重命名 *Magnets\_Separate1 为 PM2*.
- 由于永磁体是不断旋转的,使用固定坐标系 (CS)对其进行定向是不可能的。所以 我们有必要使用面坐标系。面坐标系是一种与物体的表面相关联的坐标系。当物 体旋转时,面坐标系随之旋转。
- 事田普瑞斯混合动力车驱动电机所用永磁体 定向如下图所示。因此我们有必要使 用面坐标系对每一永磁体进行定向。



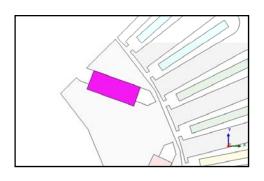
★ 切換从物体到表面模式可通过单击 ff按钮或使用工具栏图标



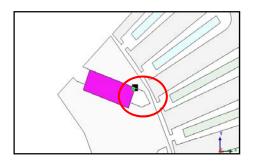


# ▲ 设置电机材料属性(续)

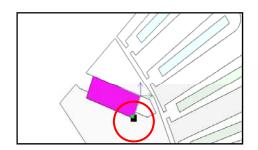
▲ 选择永磁体 **PM1** 的表面如下图所示



- 建立与这表面相关联的面坐标系
  - 1. 选中菜单栏 3D Modeler > Coordinate System > Create > Face CS 或选中工 具栏图标 。
  - 2. 这时模型处于绘图状态,我们希望面坐标系的坐标原点处于被选中的平面上。我们用鼠标捕捉面的任一对角点,可使用 "*snap to vertex symbol*"。这样就确定了面坐标系的中心。



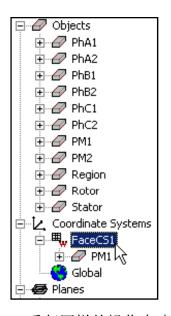
3. 你还需要确定 X轴的方向, 鼠标捕捉面的另一顶点。

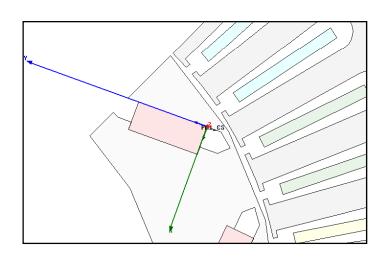




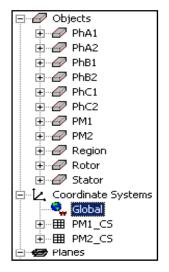
## ▲ 设置电机材料属性(续)

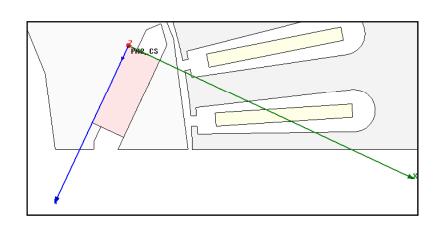
我们建立了面坐标系。它的默认名为 *FaceCS1*。我们可重命名 *FaceCS1* 为 *PM1 CS*.





重复同样的操作来建立与*PM2* 关联的面坐标系 *PM2\_CS*。我们要确认它的 X 轴 正方向指向气隙。





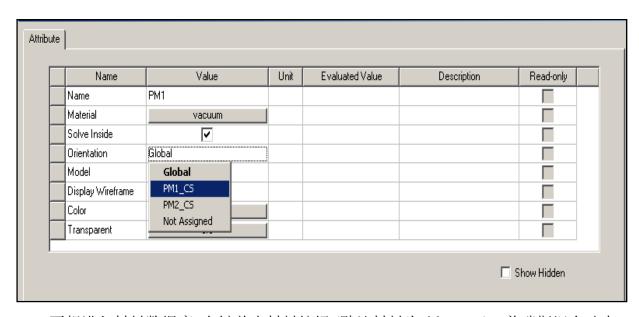
如下所示,可通过单击 Global 来重置工作坐标系为全球坐标系。



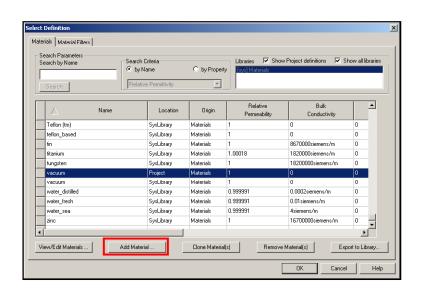


## ▲ 设置电机材料属性(续)

下面来编辑物体 *PM1*的属性。我们可通过选中*PM1\_CS* 坐标系统来改变物体的定向。这坐标系统为永磁体磁化方向的基准方向。



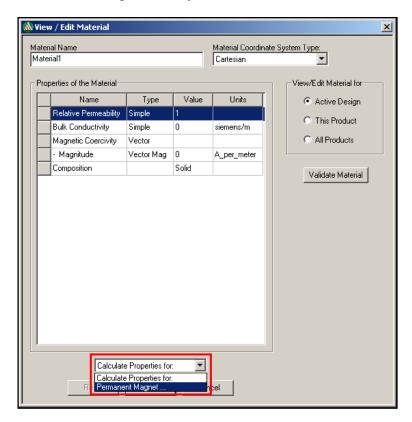
要想进入材料数据库, 左键单击材料按钮 (默认材料为 *Vacuum*)。普瑞斯混合动力车用永磁材料不属于材料库的默认材料, 所以我们左键单击添加材料按钮



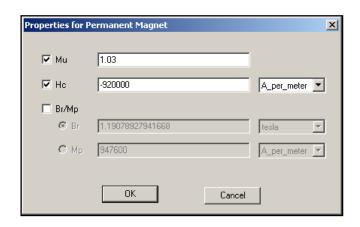


# ▲ 设置电机材料属性(续)

我们有一个特殊的菜单可用来修改永磁材料参数。 在 View/Edit 材料窗口的下方, 单击 "*Permanent Magnet*" entry.



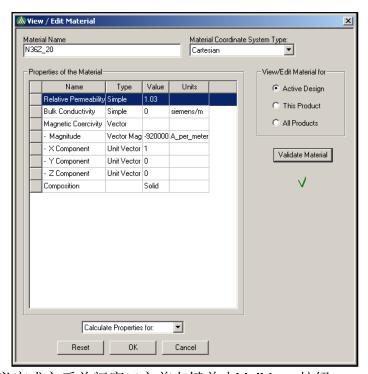
按下面的窗口的数据来输入永磁材料参数





# ▲ 设置电机材料属性(续)

- ▶ 更改材料名称为 N36Z 20.
- 如果 *PM1\_CS* 坐标系系统的X 轴正方向如下图所示背离气隙,则我们设置X component的值为1, Y 和 Z components的值为0, 否则X component的值为-1, Y 和 Z components的值为0。



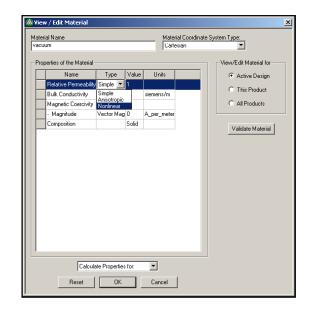
- ▲ 在材料定义完成之后关闭窗口之前左键单击Validate 按钮。
- 下面设置 *PM2*.的材料属性。选择 *PM2\_CS* 坐标系系统可对物体的定向进行修改。 这个坐标系系统用来定义永磁体磁化方向的基准方向。如果定义的 PM2\_CS 与 PM1\_CS 是一致的( X 轴指向气隙), 你可将同样的材料 *N36Z\_20* 赋给 *PM2*。 如果 不是如此, 你可重新拷贝材料 *N36Z\_20* 并更改其定向与 *PM2\_CS* 相一致。



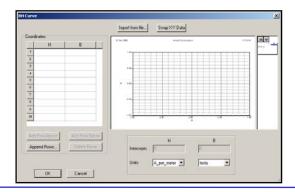
# ▲ 设置电机材料属性(续)

#### ▲ 硅钢片材料定义

- 电机的定子和转子使用同样的材料。选择 *Stator* 和 *Rotor*,编辑它们的属性, 更改它们默认的材料。在材料库, 添加一名为 *M19\_29G*的新材料 *。*
- 由于铁心材料是非线性的, 进入 non-linear B-H Characteristic窗口, 将其相对磁导率由 "Simple" 改为 "Nonlinear"。



▲ 在数值栏左键单击 BH curve 按钮。就出现了BH curve 输入窗口

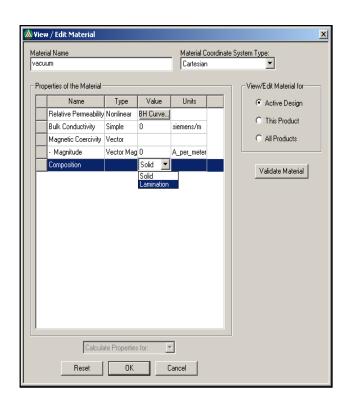




# ▲ 设置电机材料属性(续)

▲ 根据下面给的值输入 B-H 特性曲线

Н	В
0	0
22.28	0.05
25.46	0.1
31.83	0.15
47.74	0.36
63.66	0.54
79.57	0.65
159.15	0.99
318.3	1.2
477.46	1.28
636.61	1.33
795.77	1.36
1591.5	1.44
3183	1.52
4774.6	1.58
6366.1	1.63
7957.7	1.67
15915	1.8
31830	1.9
111407	2
190984	2.1
350138	2.3
509252	2.5
560177.2	2.563994494
1527756	3.779889874

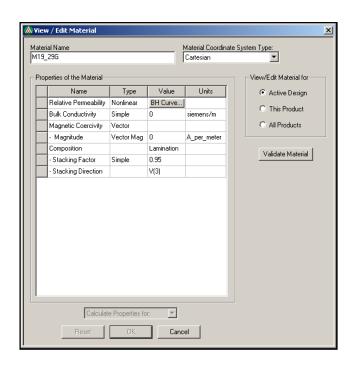


- B-H 曲线输入之后,我们还需输入硅钢片叠压系数。叠压系数是硅钢片由于绝缘而引起的有效比值。同时我们还需提供硅钢片的叠压方向。如上所示改变Composition value 由原来的"Solid"改为"lamination"。Maxwell 认为相对磁导率的均质化方向沿硅钢片叠压方向。
  - 1. 输入0.94 为硅钢片的叠压系数,这意味着有6%的硅钢片片间绝缘。
  - 2. 输入 V(3) (Z轴) 为叠压方向



# ▲ 设置电机材料属性(续)

- ▲ 在本例中,我们忽略涡流的存在,也就是硅钢片的电导率为0
- ▲ 在退出 View/Edit 材料窗口时确认材料已改变。



▲ 将材料 *M19\_29G* 赋给 Rotor 和 Stator。

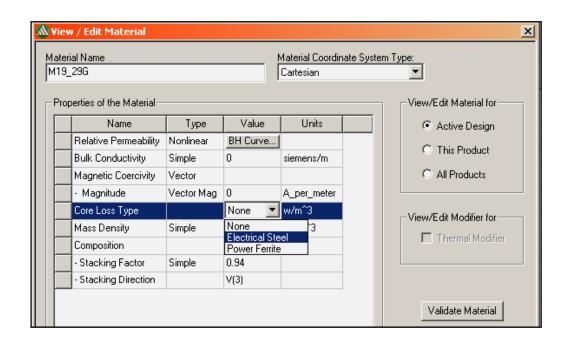


#### \* 铁耗求解

- 本章内容仅用于计算电机铁耗
- 在瞬态场求解器中, 我们能够计算铁耗 (磁滞损耗), 绕组损耗及涡流损耗 (or proximity loss)。 在本章我们只计算铁耗。
- 我们需要输入硅钢片的有关损耗值。Maxwell 通过一个详细的菜单帮助用户输入数据。
- ▲ 展开工程树, 左键双击硅钢片 M19\_29G



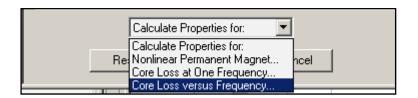
▲ 使用下拉菜单改变 core loss type 为 Electrical Steel 材料



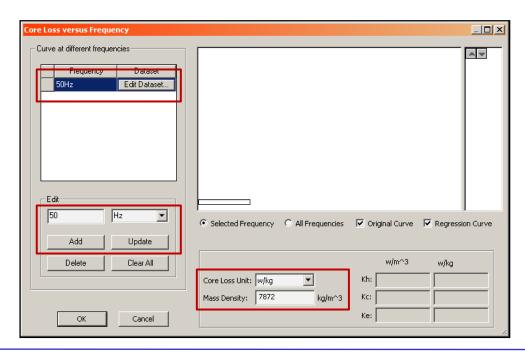


#### ▲ 铁耗求解(续)

- 求解铁耗需要一系列参数如 Kh, Kc, Ke 和 Kdc。一特殊菜单可让你从铁耗数据中提取上述参数。
- 从材料定义窗口的下拉菜单中选择 Core Loss versus Frequency



- Core Loss versus Frequency 菜单弹出。我们提供了几个频率的数据
  - 1. 选择 W/kg 为铁耗单位
  - 2 输入 7872 kg/m³ 为硅钢片材料的密度
  - 3. 在编辑窗口输入 50 Hz
  - 4. 左键单击 *Add*
  - 5. 在频率窗口点击 Edit Dataset

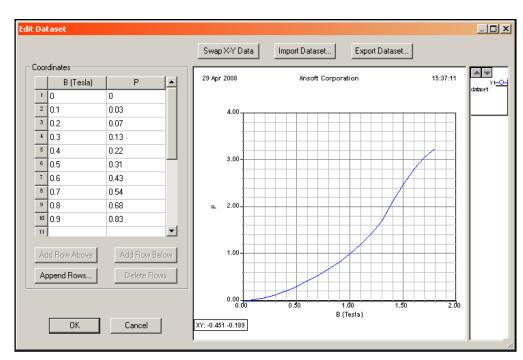




## ▲ 铁耗计算(续)

输入硅钢片在 50 Hz时的损耗曲线

50 Hz		
В	Р	
0	0	
0.1	0.03	
0.2	0.07	
0.3	0.13	
0.4	0.22	
0.5	0.31	
0.6	0.43	
0.7	0.54	
0.8	0.68	
0.9	0.83	
1	1.01	
1.1	1.2	
1.2	1.42	
1.3	1.7	
1.4	2.12	
1.5	2.47	
1.6	2.8	
1.7	3.05	
1.8	3.25	



- ▲ 设置生效
- 使用同样的方法分别输入硅钢片在 100, 200, 400, 1000 Hz 下的损耗曲线

100Hz		
В	Р	
0	0	
0.1	0.04	
0.2	0.16	
0.3	0.34	
0.4	0.55	
0.5	0.8	
0.6	1.08	
0.7	1.38	
0.8	1.73	
0.9	2.1	
1	2.51	
1.1	2.98	
1.2	3.51	
1.3	4.15	
1.4	4.97	
1.5	5.92	

200Hz	
В	Р
0	0
0.1	0.09
0.2	0.37
0.3	0.79
0.4	1.31
0.5	1.91
0.6	2.61
0.7	3.39
0.8	4.26
0.9	5.23
1	6.3
1.1	7.51
1.2	8.88
1.3	10.5
1.4	12.5
1.5	14.9
1.5	14.9

В	Р
0	0
0.1	0.21
0.2	0.92
0.3	1.99
0.4	3.33
0.5	4.94
0.6	6.84
0.7	9
0.8	11.4
0.9	14.2
1	17.3
1.1	20.9
1.2	24.9
1.3	29.5
1.4	35.4
1.5	41.8

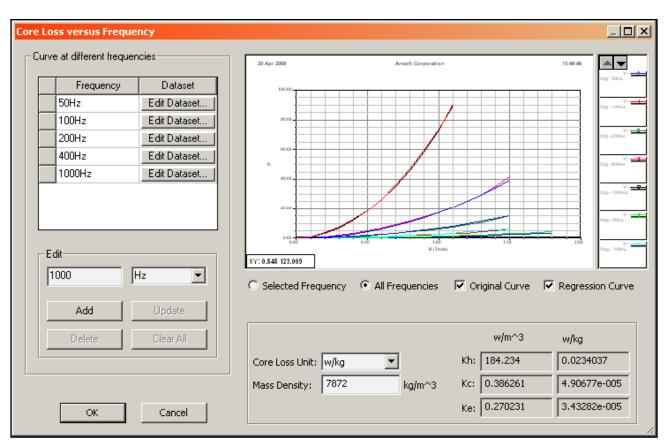
400Hz

Р
0
0.99
3.67
7.63
12.7
18.9
26.4
35.4
46
58.4
73
90.1

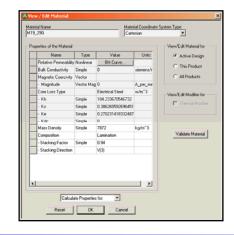


#### ▲ 铁耗求解(续)

自动计算铁耗系数



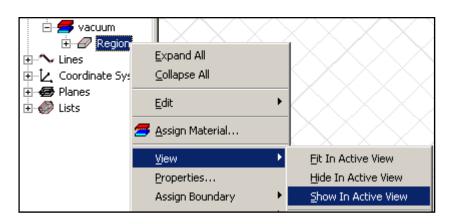
▲ 设置生效后, 硅钢片材料定义中就含有相应的铁耗系数



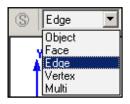


## ▲ 主/从边界属性设置

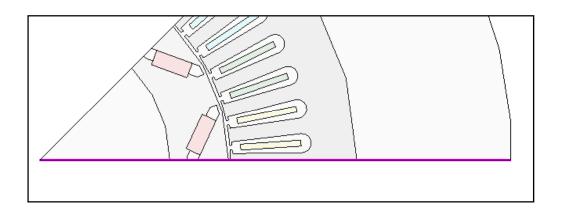
- 设置主/从边界能充分利用电机周期性的特点。下面将定义两种边界: 主边界和从边界。从边界上任一点的磁场强度与主边界上任一点的磁场强度相对应 (大小相等,同向或反向)。
- 在当前视窗中选择物体 *Region* 。 右键单击并选中 *View> Show In Active View* as shown below



▲ 改变选中的模式为 **Edge** 



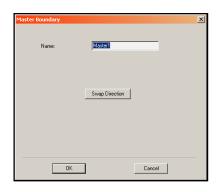
▲ 选择 **Region**的一条边界线



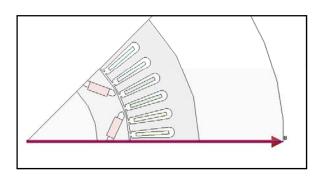


# ▲ 设置主/从边界(续)

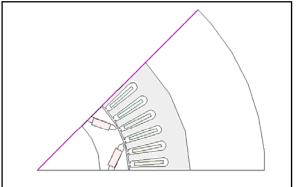
▲ 右键单击并选中 Assign Boundary > Master



注意向量 u 的方向,设置生效。



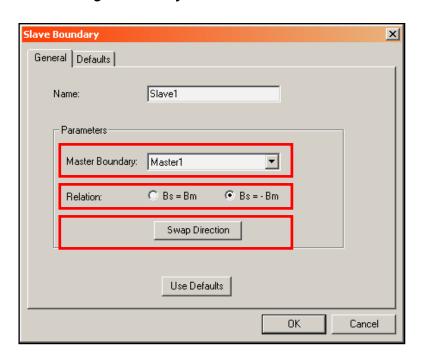
选择Region的另一条边界



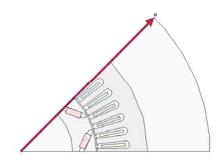
## MAXWELL® 2D

# 设置主/从边界 (续) Topic - Motor Application Note

▲ 右键单击并选中 Assign Boundary > Slave



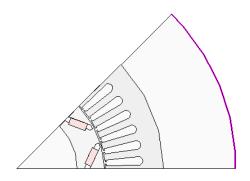
- 1. 我们首先需要给定主边界的基准。对主边界来说, 我们没必要改变其默认名 称 *Master1。*
- 2. 如果向量u的方向与主边界方向不一致的话我们可通过选择 *Swap direction* 来改变向量 u 的方向。
- 3. 模型显示了电机一对极的情况。由于电机的极对数为奇数, 所以 Slave = Master。
- 4. 接受我们所做的主从边界设置。



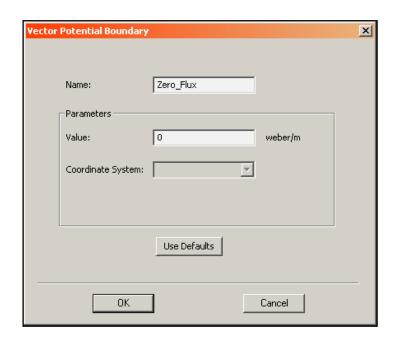


## ▲ 零向量边界条件设置

选择Region的最外边的圆弧,有五个小线段组成,分别选择这些线段。使用 Ctrl 按钮可进行多个选择。



- ▲ 右键单击并选中Assign Boundary > Vector Potential
  - 1. 将Value赋值为零
  - 2. 将该边界条件命名为 Zero\_Flux





# ▲ 稳态分析

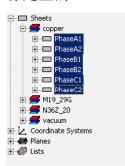
- **我们将对电机稳态下的不同性能进行研究。**
- ▲ 保存工程。点击 '**2\_Partial\_motor**', 右键单击并选中 'Copy'.

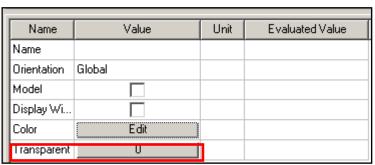


点击工程名称,右键单击并选中粘贴。改变所复制的工程名称为 "3\_Partial\_motor\_MS".

## ▲ 空载情况下的研究

- 我们首先对由永磁体单独产生的磁场进行分析。
- 在这个模型中,由于绕组没有定义电流,所以定子绕组暂不需要。选中6个绕组,在模型的属性窗口中勾去 Model 按钮。注意由于我们同时选中几个物体,物体的名称是空的。



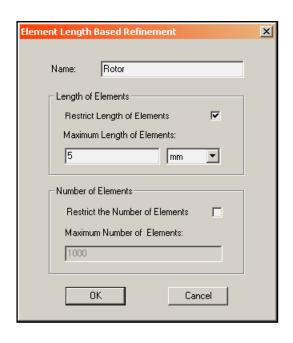


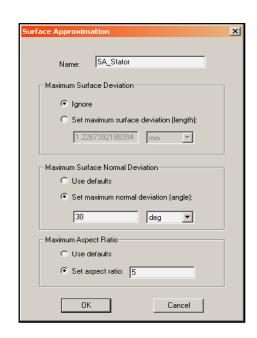
线圈继续处于选中状态, 通过选中菜单栏 View > Hide Selection > Active view 或使用工具栏图标 来隐藏绕组。



#### ▲ 网格剖分设置

- 自适应网格剖分是非常强大的剖分手段,我们并不需要作额外的剖分操作。当然如果我们可以根据电机的特性,设置一个比较合理的初始剖分,从减少仿真时间的角度来说也是一个很好的主意。减少硅钢片区域剖分单元数可加快非线性求解的速度。
- 选中物体 Rotor,右键单击并选中 Assign Mesh Operation > Inside Selection > Length Based



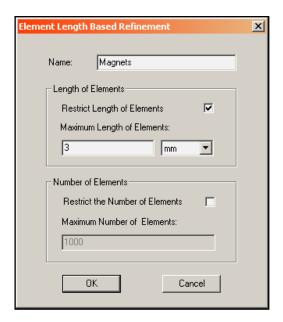


- ▲ 限制剖分单元的长度为 5 mm.
- ▲ 重命名剖分操作 为 Rotor
- 选择物体 Stator。我们想减少定子槽剖分网格数目。右键单击并选中 Assign Mesh Operation > Surface Approximation。
  - ▲ Maximum surface deviation一栏中输入30deg。
  - ▲ Maximum aspect Ratio一栏中输入5.
  - ▲ 重命名该剖分操作为 SA\_Stator



## ▲ 网格剖分处理(续)

选中 PM1 和PM2。右键单击并选中 Assign Mesh Operation > Inside Selection > Length Based



- № 限制单元长度最大为 3 mm.
- ▲ 重命名剖分操作为 Magnets

#### ▲ 进行电机转矩求解

选择物体 PM1, PM2 和 Rotor。 右键单击并选中 Assign Parameters > Torque



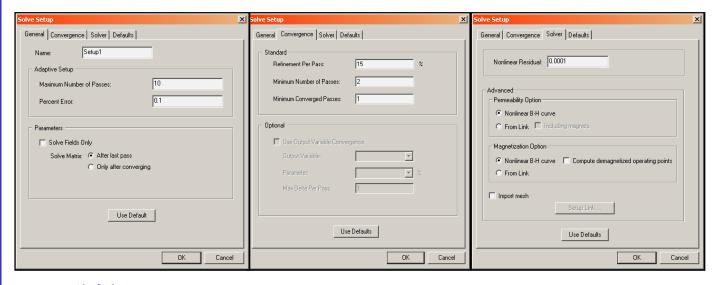


## ▲ 添加一个新的分析设置

在工程管理器中, 右键单击并选中 Analysis and select Add Solution Setup.



- 1. 在 maximum number of passes这一栏中输入10
- 2. 在 percent error 这一栏中输入0.1
- 3. 在 convergence对话框中, 在refinement per pass 这一栏中输入 15
- 4. 在solver对话框中,确认Non Residual 这一栏中输入 0.0001%。 左键单击 Ok 按钮保存 这个分析设置。



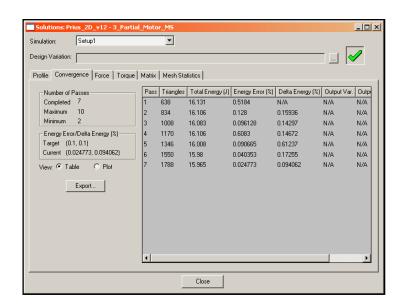
# ▲ 分析

▲ 右键单击并选中 Analyze 或选中工具栏图标 💵 。

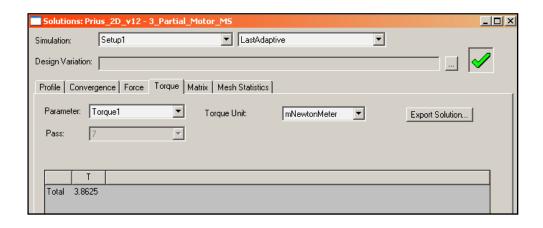


### ▲ 后处理

计算需要7步才达到收敛。右键单击Setup1再选中 Convergence 面板或选中菜单栏 *Convergence*我们可看到结果。



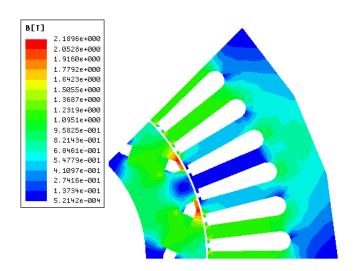
**转矩值求解。**选择求解栏,所给出的转矩值是电机铁心长为1米时转矩值。整个电机的转矩要在此基础上乘以8 (周期系数), 再乘以0.082 (考虑到电机的实际长度)。 得出转矩值为 2.5mN.m, 这看起来是比较合理的: 相对于负载运行时是比较小的。定转子之间不同的位置角得出不同的转矩值。





#### ▲ 后处理(续)

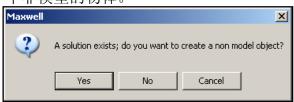
绘制磁通密度分布图。 选中 Rotor, Stator, PM1, PM2 右键单击并选中 All Object Faces。鼠标再次右击并选择 Fields > B > Mag\_B. 我们获得磁通密度 B 在整个物体上的分布。如我们所希望的那样,硅钢片靠近永磁体附近高度饱和。这些饱和是由永磁体造成的。



- 观察气隙的磁场强度H分布。我们需要在后处理中绘制一条线来观察场分布:
  - 1. 绘制一条圆弧, 选中菜单栏 Draw > Arc > Center Point 或使用相应的工具 栏图标

シャション (シ)や

2. 接受并绘制一个非模型的物体。



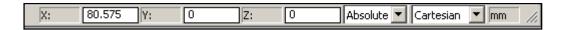
3. 输入弧线的圆心 0.0.0 mm 点击enter输入





### ▲ 后处理(续)

4. 输入弧线的第一点。这个点在YZ 平面气隙的中间,输入其坐标 *80.575, 0, 0 mm* 并点击enter键输入。



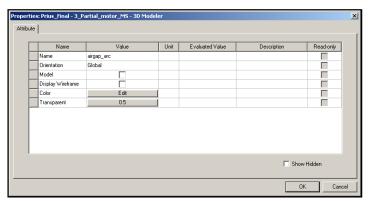
5. 输入弧线的最后一点。这个点处于 XY平面, 与X轴负方向成45度角, 输入其 坐标Enter *56.70996, 56.70996, 0 mm*并点击enter键输入。



6. 要完成弧线的绘制,移动鼠标到绘图区,右键单击并选中弹出的快捷菜单栏选项done。



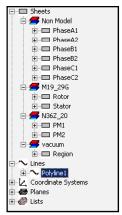
7. 将弧线命名为 airgap\_arc



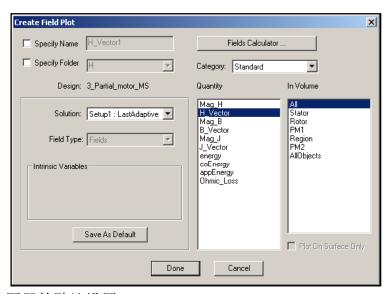


## ▲ 后处理(续)

8. 一个新的文件夹 'Lines' 出现在目标树中, 包含我们刚定义的圆弧。



9. 选中圆弧 *airgap\_arc*, 移动鼠标到绘图区, 右键单击并选中菜单栏 *Fields > H\_vector*.

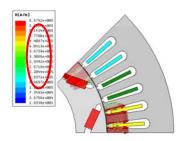


10. 接受场绘图器的默认设置

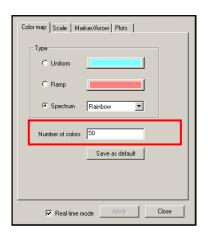


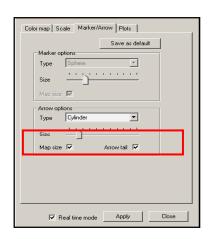
## ▲ 后处理(续)

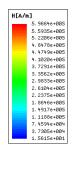
11. 采用默认设置的H 矢量分布图如下图所示。 如要个性化显示设置, 双击刻度 区域:

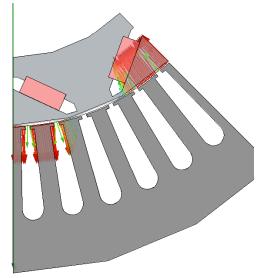


12. 用户可更改默认设置,如下图所示。





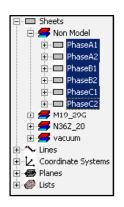


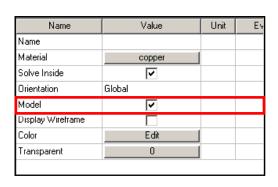




# ▲ 负载分析

- ▲ 保存项目。点击 Maxwell 设计 '3\_Partial\_motor\_MS, 点击右键并选择'Copy'.
- 点击项目名称,右键点击并选择**Paste**。把复制的设计重命名为 "**4\_Partial\_motor\_MS2**".
- ▲ 在此设计中,我们需要在线圈中通入电流:需要把线圈加入到计算区域。在模型结构树中选中6个线圈。在属性窗口,选中单选按钮 *Model*。





通过选择菜单项 View> Show selections> All views 取消隐藏线圈

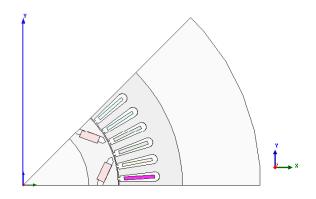
#### ▲ 添加激励

- 计算模型不是整个电机,只有部分线圈。电机是由三相对称电源供电,我们需要输入流入流出每个线圈的电流。例如在我们所用的例子中,输入:
  - ▲ 1500 A 到 PhaseA
  - ▲ -750 A 到 PhaseB
  - → -750 A 到 PhaseC.
- 在进行静磁计算时,激励源是以电流形式给的。这时候我们不需要建立每匝线圈的模型,因此我们只需要输入每相总的电流就行了。匝数和电气拓扑结构只在进行电感计算时考虑。

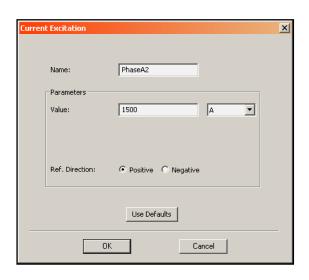


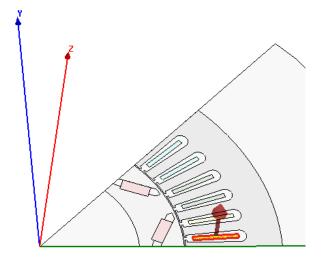
#### ★ 输入激励(续)

- ▲ 转换选择模式到 face
- 给 PhaseA2 输入激励:
  - 1. 选中 PhaseA2



- 2. 点击右键,选择菜单项 Apply Excitation > Current
- 3. 重新命名激励为PhaseA2
- 4. 输入 **1500A**
- 5. 如图红色箭头为默认电流方向,保留选中 Positive
- 6. 确认激励设置

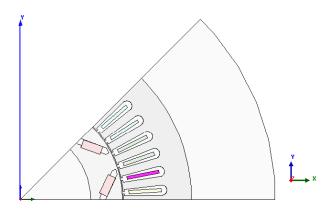




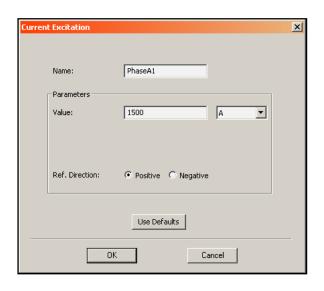


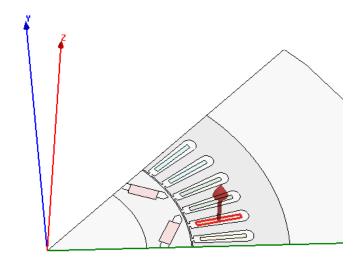
#### 输入激励(续)

- ▲ 转换选择模式到 face
- 给 PhaseA1 输入激励
  - 1. 选中 PhaseA1



- 2. 点击右键,选择菜单项 Apply Excitation > Current
- 3. 重新命名激励为 PhaseA1
- 4. 输入 1500A
- 5. 红色箭头为默认电流方向,保留选中 Positive
- 6. 确认激励设置

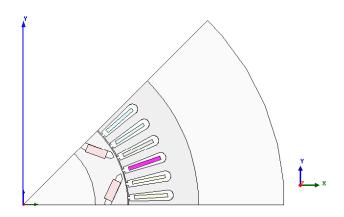




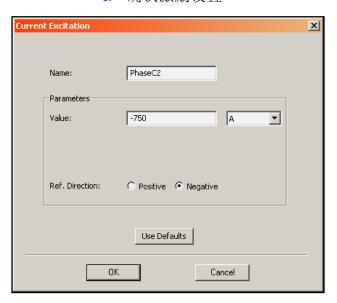


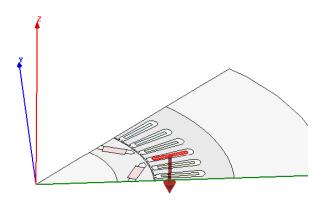
#### ★ 输入激励(续)

- 转换选择模式到 face
- ▲ 给PhaseC2输入激励
  - 1. 选中 PhaseC2



- 2. 点击右键,选择菜单项 Apply Excitation > Current
- 3. 重新命名激励为 PhaseC2
- 4. 输入-750A
- 5. 由于红色箭头所示电流方向反向,选中 Negative
- 6. 确认激励设置

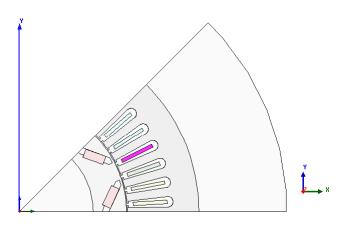




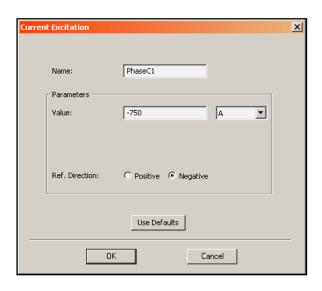


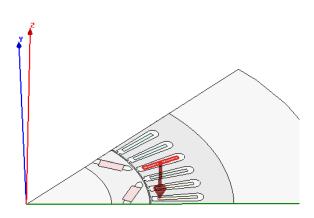
#### ▲ 输入激励(续)

- ▲ 转换选择模式到 face
- ▲ 给PhaseC1输入激励
  - 1. 选中 PhaseC1



- 2. 点击右键,选择菜单项 Apply Excitation > Current
- 3. 重新命名激励为 PhaseC1
- 4. 输入 -750A
- 5. 由于红色箭头所示电流方向反向,选中 Negative
- 6. 确认激励设置

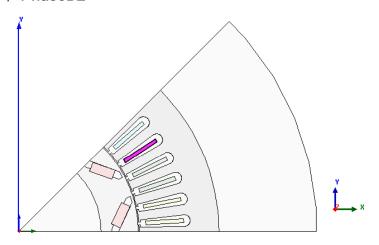






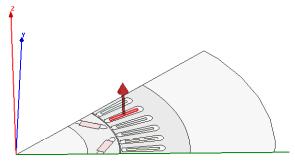
#### ★ 输入激励(续)

- ▲ 转换选择模式到 face
- ▲ 给PhaseB2输入激励
  - 1. 选中 PhaseB2



- 2. 点击右键,选择菜单项 Apply Excitation > Current
- 3. 重新命名激励为 PhaseB2
- 4. 输入-750A
- 5. 由于红色箭头所示电流方向正确,保留选中 Positive
- 6. 确认激励设置

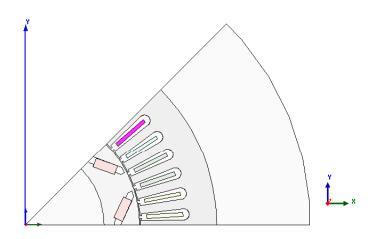






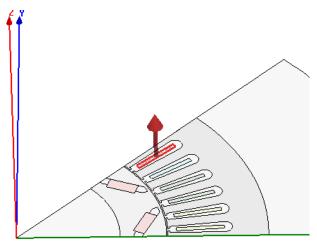
#### 输入激励(续)

- ▲ 转换选择模式到 face
- 给 PhaseB1 输入激励
  - 1. 选中 PhaseB1



- 2. 点击右键,选择菜单项 Apply Excitation > Current
- 3. 重新命名激励为 PhaseB1
- 4. 输入-750A
- 5. 红色箭头所示电流方向正确,保留选中 Positive
- 6. 确认激励设置

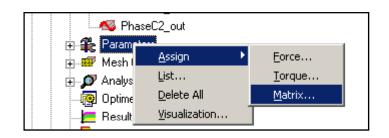




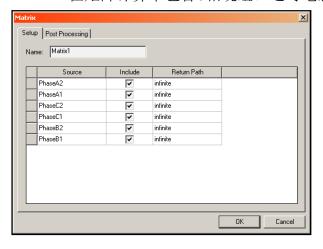


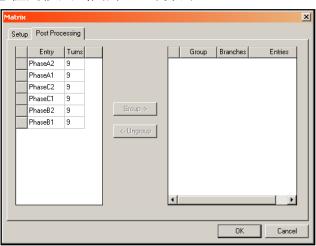
#### ▲ 电感计算

- 我们比较关注电感值的计算。激励源的设置与绕组排列无关,因为我们只需给每个端面输入相应的安匝数。在考虑电感时,需要输入线圈的匝数以及线圈是如何电气连接的。
- 选中项目结构树中的 Parameters, 右键点击并选择 Assign > Matrix



▲ 在矩阵计算中包含6相绕组。这时电感值是按照线圈为1匝计算的。



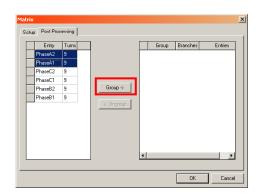


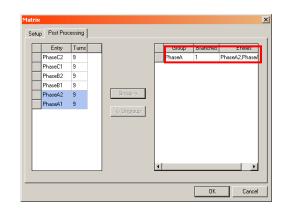
- 选中后处理栏。在这个面板定义每个线圈的匝数。这六个线圈匝数输入为9。
- 同时我们需要把同相的所有线圈划为一组。这样我们可以得到整个绕组的电感值。



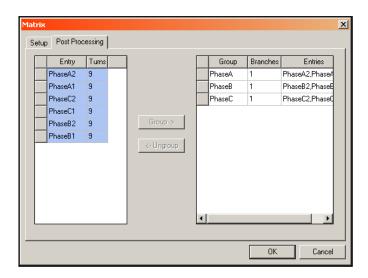
### ▲ 电感计算(续)

- ▲ 选中 *PhaseA1\_in* 和 *PhaseA2\_in*,然后点击 group 按钮
- 命名线圈组名为 PhaseA





★ 对全部三相重复这些操作



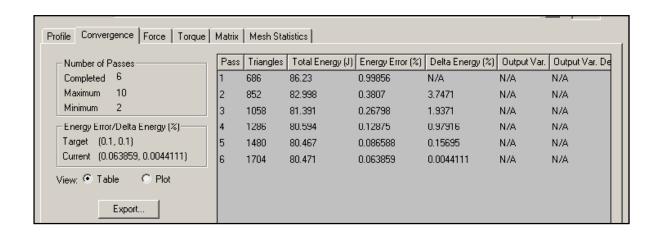
### ▲ 分析

▲ 右键点击 setup 选择 Analyze 或者 点击 ● 按钮.

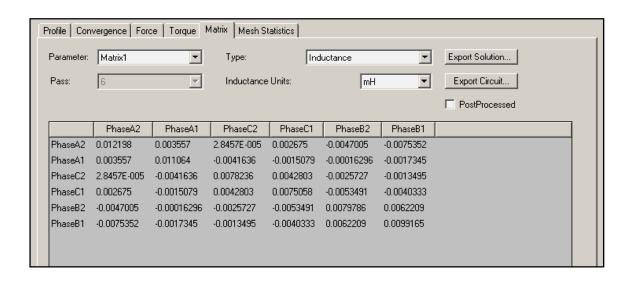


### ▲ 后期处理

△ 六步计算后可以实现收敛。鼠标右键点击Setup1,选择菜单按钮中的收敛即可看见收敛信息面板



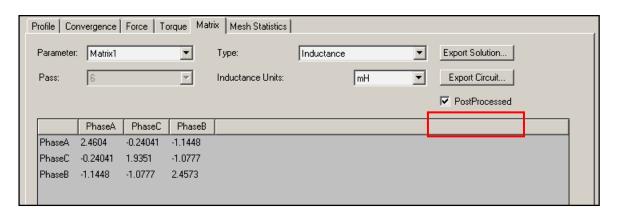
电感参数。选择"Solutions"图标,每个线圈的电感值就会出现。其中假定每个 线圈是单匝的。



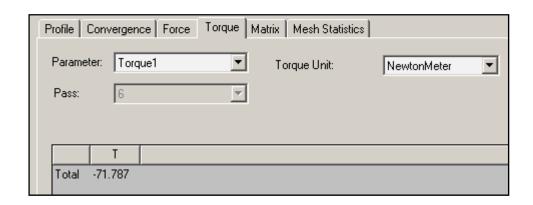


## ▲ 后期处理(续)

选上单选按钮"Post Processed",每个绕组的电感值就会显示出来。



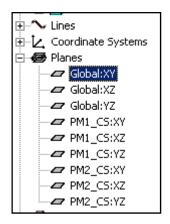
- 注意: 可以通过使用 Export Circuit 按钮把电感矩阵输出到 Simplorer 中。
- **转矩值.** 选择"*Solutions*"按钮,从下拉菜单选择Torque1。对整个电机来说转矩还需乘8(周期系数),然后乘0.083(电机长度),这样得到结果大约为47N.M。此时,我们没有使转子磁极的位置与绕组电流同步,所以我们还得不到能够获得最大转矩的优化激励值。定转子之间相差不同的角度可以得到不同的值。



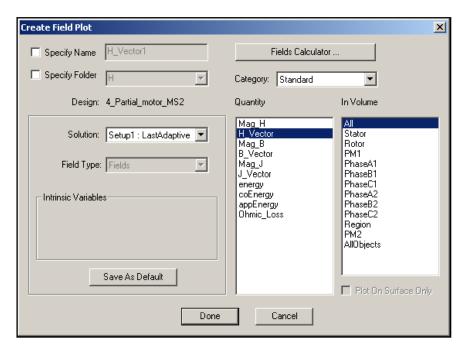


## ▲ 后期处理(续)

**在XY平面上绘制磁场强度 H 分布图**。在模型的树型菜单中属于全局坐标系的子栏 里选择XY平面。



▲ 把鼠标移到画图区域,点击右键,依次选择菜单项 Fields > H > H\_vector

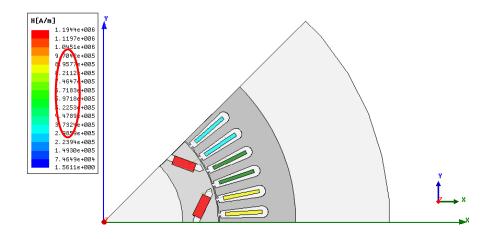


▲ 确认设置

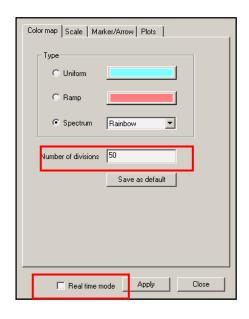


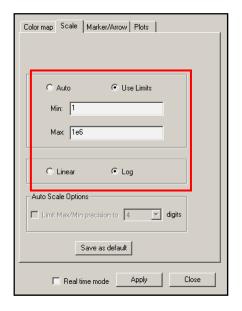
## ▲ 后期处理(续)

▲ 在默认参数设置下,磁场强度H显示是比较小的。双击刻度范围显示面板



- A 在 Color Map 栏,取消选择'Real time mode'选项并把颜色剖分数量改到50
- ▲ 在 *Scale* 栏中,选上 *Use Limits* 选项,然后输入1 和1e6 作为上下限。同时 选上*Log* 选项以得到对数标度。

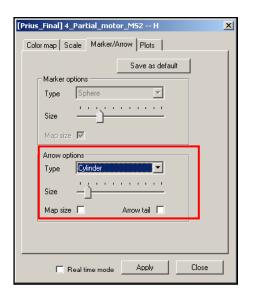


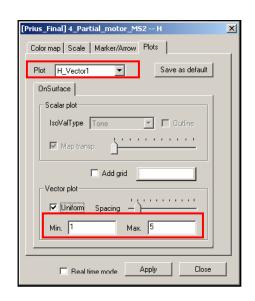




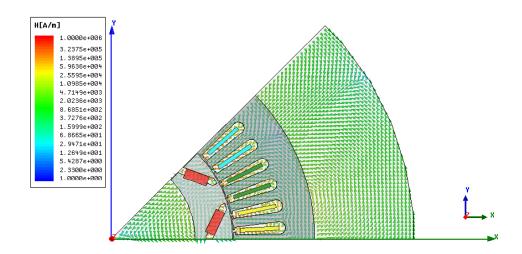
## ▲ 后期处理(续)

- 在'Marker/Arrow'选项栏中,减小箭头的尺寸,然后取消选择Mapsize 和Arrow tail 选项。
- 在'*Plots*'选项中,确定选择的绘制对象与前面的一致,然后分别把矢量绘制最小和最大值修改为**1**和**5**





\* 我们可以得到下面的图形。由于A相输入电流较大,其周围磁场强度也相对较大。



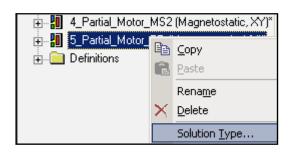


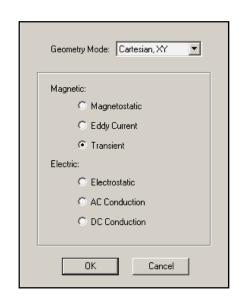
# ▲ 动态分析

- **我们将分析电机的瞬态特性。**
- ▲ 保存项目。点击Maxwell设计中'2\_Partial\_motor',右键点击并选择'Copy'。



- 点击项目名称,右键点击并选择'Paste'。把复制过来的项目重命名为'*5\_Partial\_motor\_TR'*。
- 从项目管理结构树中选择设计名字,点击右键,把解算类型从*Magnetostatic* 改为 *Transient*。



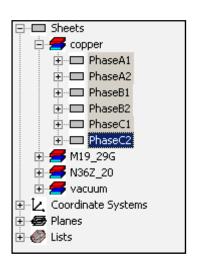


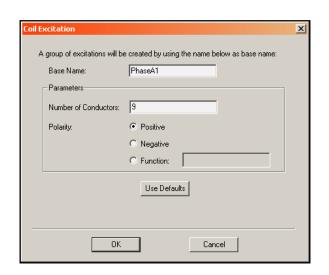


- ₩ 瞬态计算与静磁计算表现不同主要是因为:
  - 没有进行自适应的网格剖分。因为在每步瞬态计算时几何形状都不同,很明显Maxwell 不会在每步计算时都相应地重做网格剖分。在动态分析中,我们将为所有的转子位置进行一次尽可能合理的网格剖分。
  - 激励源设置不同。在静磁计算中,我们仅关注流入导体的总电流。而在瞬态 计算中,由于电流是任意的时间函数,我们使用绞线导体(需要明确每个绕 组的准确导体数)。我们需要创建专用的线圈和绕组。

#### ▲ 创建线圈

- 选中PhaseA1, PhaseA2, PhaseB1, PhaseB2, PhaseC1 和 PhaseC2 6个线圈。
- A 用右键点击并选择菜单按钮 Assign Excitation > Coil
  - 1. 保留默认名称
  - 2. 导体数输入为9

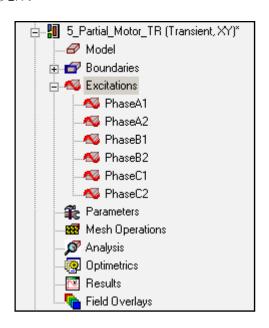




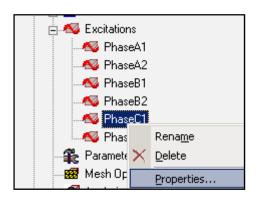


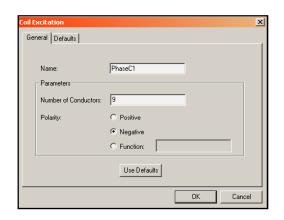
#### ▲ 创建线圈 (续)

★ 六个线圈的定义完成



- 我们需要为线圈PhaseC1 和 PhaseC2 改变方向:
  - 1. 在项目管理结构树中选中 PhaseC1
  - 2. 点击右键并选中属性栏
  - 3. 将线圈极性从正极性改为负极性
  - 4. 对线圈PhaseC2 重复1-3步操作

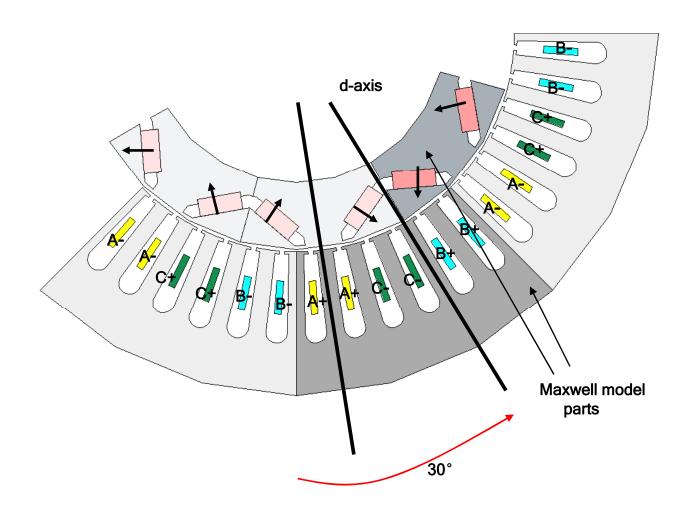






#### ■ 电机激励

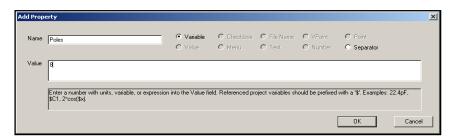
- ▲ IPM永磁电机的转子是与定子磁场是同步的。这种与转子旋转同步的激励使永磁体产生的磁通是最大的。
- ▲ 通入激励是三相对称电流,相序为A+C-B+
- 在 t=0时刻, A相要处于对应于d轴的轴线上。因此我们需要把转子的初始位置移动 30度以使转子磁极与A+A-中心线对应起来。



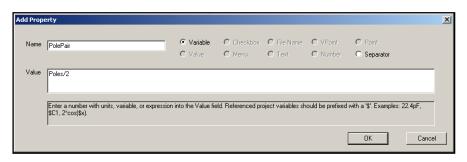


#### ▲ 设置激励参数

- 需要定义将被用于定义激励的参数
- ▲ 选择菜单按钮 Maxwell 2D> Design Properties
- ▲ 参数窗口弹出
- 点击添加按钮来增加电动机的极数
  - ▲ 在名称区域输入 Poles
  - ▲ 在数值区域输入8
  - ▲ 点击OK来确认参数设置



- ▲ 用同样的方法输入:
  - ▲ PolePair, 极对数;它的数值为 Poles/2

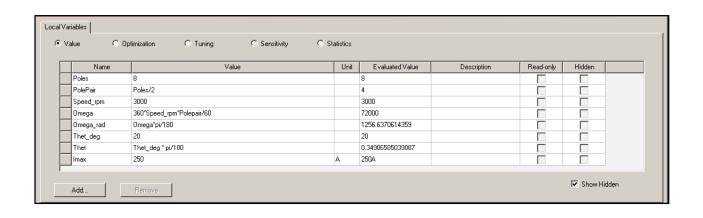


- ▲ Speed\_rpm, 以 rpm 为单位的转速;数值为 3000
- Omega, 以 degrees/s 为单位的激励变化率;数值为 360\*Speed\_rpm\*Polepair/60
- ▲ Omega\_rad 以 rad/s 为单位的变化率;数值为 Omega \* pi / 180
- ★ Thet\_deg 电动机的功率角;例如,在此研究中我们用20 degrees;那么输入20 deg。
- **Thet** 是以弧度表示的功率角,所以它的数值为**Thet\_deg \* pi /180**
- ▲ *lmax* 电动机绕组电流的峰值:数值为250A.



#### ▲ 设置激励参数(续)

▲ 设计选项面板最后显示如下:



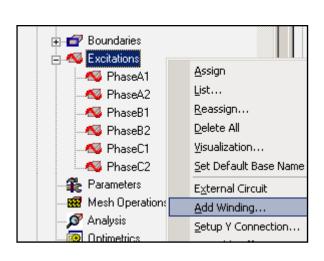
### ▲ 创建绕组

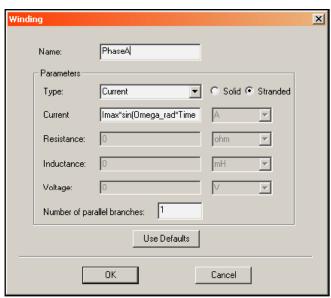
电机的绕组是三相对称连接的,输入激励为正弦波。在每个时间点,各相之间相差120度,其中负载角也是加在其中的。



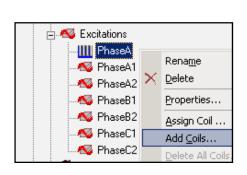
#### 定义绕组(续)

▲ A相绕组.. 在项目树中,鼠标右键点击 Excitations ,然后选择菜单项Add Winding





- 1. 名称为输入 PhaseA
- 2. 因为每个端面有9匝,故选上Stranded
- 3. 输入绕组电流: *Imax\*sin(Omega\_rad\*Time+Thet)。 Time* 是系统变量,表示当前时间。
- 4. 点击 **OK**
- 5. 在项目树中用鼠标右键点击绕组*PhaseA*,选择菜单项 *Add Coils*



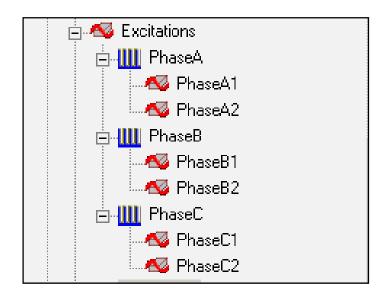


6. 结合Ctrl 按钮选上 PhaseA 的2个线圈并点击 OK



#### ▲ 创建绕组(续)

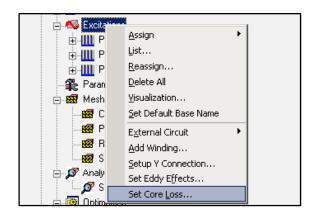
- B相绕组.. 从项目结构树中用鼠标右键点击 Excitations, 然后选择菜单项 Add Winding。重复操作如下:
  - ▲ 给 *PhaseB* 命名
  - 绕组电流为 *Imax\*sin(Omega\_rad\*Time-2\*pi/3+Thet)。*它比A相电流偏移 120 degrees。
  - ▲ 选上PhaseB的2个线圈
- C相绕组..从项目树中用鼠标右键点击 Excitations, 然后选择菜单按钮 Add Winding。重复操作如下:
  - ▲ 给 *PhaseC* 命名
  - ▲ 绕组电流为 *Imax\*sin(Omega\_rad\*Time+2\*pi/3+Thet)。*它比A相电流偏移 +120 degrees。
  - ▲ 选上PhaseC的2个线圈
- 项目结构树中在每组绕组下现在应该包含这些端面:



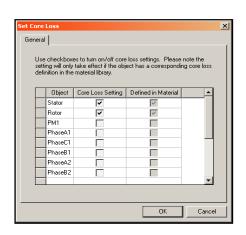


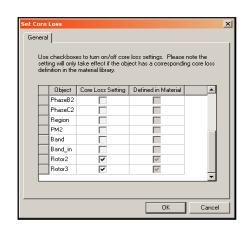
#### ▲ 添加铁心损耗计算

默认情况下并未涉及铁心损耗。如果希望把它们考虑在内的话,展开项目结构树窗口,用鼠标右键点击 *Excitations> Set Core Loss* 



- 选择铁质部件: Stator, Rotor, Rotor2 和 Rotor3
- ▲ 确认设置





**注意**: 在材料设置时需要设置铁心损耗的参数

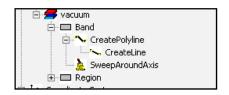


#### ▲ 添加Band

- 运动部件(转子和永磁体)需要包围在空气部件—Band中。这样可以把运动部件和项目中固定的部分隔离开。以下是一些在设置电动机Band部件时要遵守的规则
  - ▲ Band必须比任何方向的转动部件(边界线除外)稍大。
  - ▲ Band应该是一个具有圆弧边界的扇形。
  - 强烈建议设置一个空气部件把所有运动部件包含在Band中。这将有利于沿气隙的网格剖分。
- ▲ 为了创建Band,需要复制这片区域并对参数做相应调整:
  - 1. 选择*object Region*,点击鼠标右键,然后选择*Edit > Copy*



- 2. 联合使用 Ctrl+V 粘贴 Region.
- 3. 将名字由 Region 1 改为 Band
- 4. 展开部件的结构树



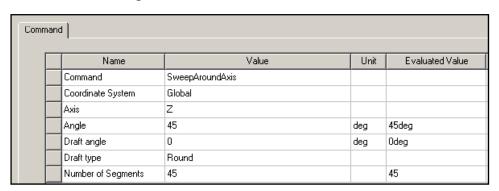


#### ▲ 添加Band (续)

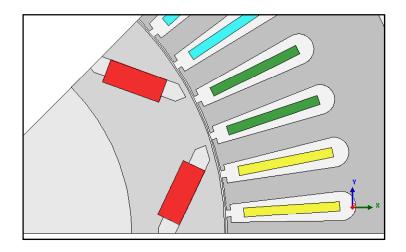
5. 双击 *CreateLine* 命令。转子半径为80.2mm。定子内半径为80.95mm。选择他们中间设置气隙带。给*Point2 输入 80.575,0,0* mm 取代 *200,0,0* 

Name	Value	Unit
Segment Type	Line	
Point1	0, 0, 0	mm
Point2	80.575 ,0 ,0	mm

- 6. 双击 Sweep AroundAxis
- 7. 将 Number of Segments 从 5 改为 45 以使每一小段线对应1度



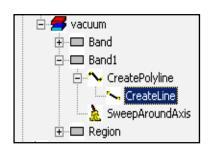
8. 保留 material 为 Vacuum.





#### ▲ 添加Band (续)

- 现在我们已经创建了一个把所有运动部件包围在**Band**中的部件。选择**Band**,点击右键,然后选择菜单**Edit > Copy**或者使用**Ctrl-C**.
- 通过右键点击并选择 *Edit > Paste* 或者使用 *Ctrl-V* 粘贴另外一个Band。一个新的部件 *Band1* 就被添加到部件行列中了。打开它的结构树,然后双击 *CreateLine*



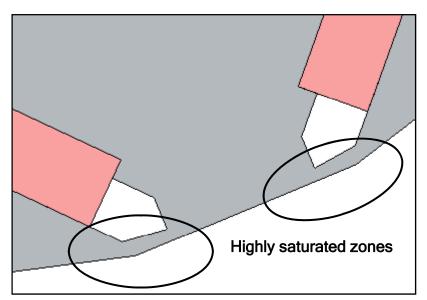
Name	Value	Unit
Segment Type	Line	
Point1	0, 0, 0	mm
Point2	80.4 ,0 ,0	mm

- ▲ 修改 *Point2*: 输入 *80.4, 0, 0* mm
- 这个操作把部件的大小调整为紧紧覆盖住转子及永磁体
- ▲ 把 Band1 重命名为 Band\_in
- **注意:** 因为我们要添加用于对运动部分进行网格剖分的部件,所以我们将在网格剖分过后进行运动属性设置。



#### ▲ 网格剖分

- 瞬态计算没有使用自适应网格剖分是因为这样就会要求在每步计算时都重新剖分网格,导致计算时间过长。通过网格剖分设置,我们将为所有瞬态仿真提供一个合理并符合要求的网格剖分。
- \* 转子靠近气隙并包围永磁体的部分被设计为高度饱和。在这些区域的网格密度要求高些。



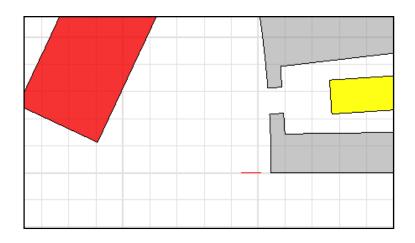
- 》为满足这个要求,我们在转子内创建了一些部件,然后进行针对这些部件的网格 剖分设置来在永磁体槽周围获得精细的网格剖分。\_\_\_\_
- ▲ 选择菜单项*Draw > Line* 或者从工具栏选择图标

  - 1. 输入 78.72,0,0 mm 作为 Point1的位置并点击 Enter
  - 2. 输入 *80.2,0,0 mm* 作为 Point2的位置并两次点击 Enter
  - 3. 把这条线命名为Rotor2



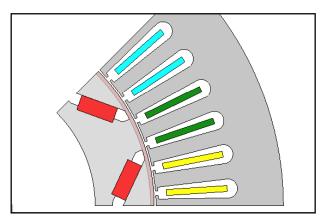
#### ▲ 网格剖分(续)

▲ 这条线如下所示:



- 选中Rotor2,点击右键并选择菜单项Edit > Sweep > Around Axis.
  - 液 按下图所示输入参数。注意Rotor 是利用UDP模块创建的,UDP会自动产生实际表面,因此气隙部件Rotor2 也必须是实际表面。所以要在其分段数栏输入0。

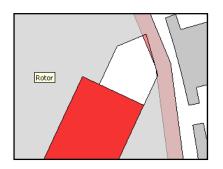




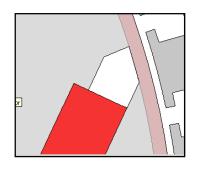


### ▲ 网格剖分(续)

- . 把*Rotor2*的材料属性改为*M19\_29G*。同样,还需要对颜色和透明度做相应设置。
- ▲ 注意: 由于 Rotor2 是完全包含在 Rotor 中,我们不需要再实施布尔操作。
- **注意:** 由于电脑显示器的像素有限,实际表面被描绘成了多面体表面。同样的原因,导致*Rotor2* 看起来象是和永磁体槽相交了但实际情况并非如此。可以通过 *View > Visualization Setting* 来修改默认的显示设置。







- ▲ 重复同样的操作创建 Rotor3.
  - 1. 用数值设置来画线:

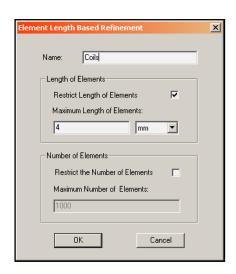
Name	Value	Unit
Segment Type	Line	
Point1	78.72 ,0 ,0	mm
Point2	79.46 ,0 ,0	mm

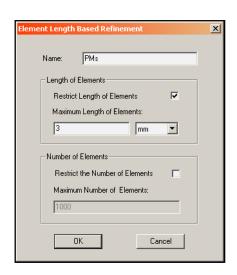
- 2. 线绕 Z 轴旋转成面
- 3. 设置材料属性为 M19\_29G



#### ▲ 网格剖分(续)

- 选中6个线圈 *PhaseA1, PhaseA2, PhaseB1, PhaseB2*, PhaseC1 和 PhaseC2. 点击右键,选择 *Assign Mesh Operations > Inside Selection > Length Based*.
  - 1. 操作命名 Coils
  - 2. 选中 Restrict Length of Elements选项
  - 3. 输入 4mm
  - 4. 取消选择 Restrict the Number of Elements选项
  - 5. 确定设置



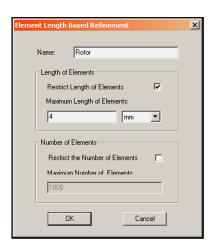


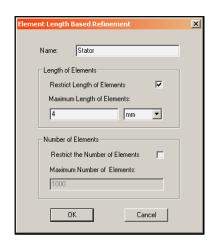
- 选中永磁体 *PM1* 和 *PM2*。点击右键,选择 *Assign Mesh Operations > Inside Selection > Length Based*.
  - 1. 操作命名 *PMs*
  - 2. 选中 Restrict Length of Elements选项
  - 3. 输入 3mm
  - 4. 取消选择 Restrict the Number of Elements选项
  - 5. 确定设置



#### ▲ 网格剖分(续)

- 选中 Rotor。点击右键,选择 Assign Mesh Operations > Inside Selection > Length Based.
  - 1. 操作命名 Rotor
  - 2. 选中 Restrict Length of Elements选项
  - 3. 输入 4mm
  - 4. 取消选择 Restrict the Number of Elements选项
  - 5. 确定设置





- 选 选中 Stator。点击右键,选择 Assign Mesh Operations > Inside Selection > Length Based.
  - 1. 操作命名 Staor
  - 2. 选中 Restrict Length of Elements选项
  - 3. 输入 4mm
  - 4. 取消选择 Restrict the Number of Elements选项
  - 5. 确定设置

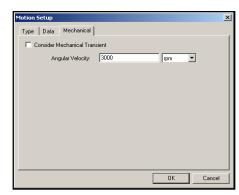


### ▲ 运动属性设置

选中 Band,点击右键并选择菜单中的 Assign Band





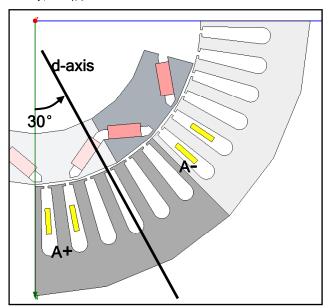


#### ▲ 在 *Type* 栏:

- ▲ 选中 *Rotate* 选项
- ▲ 确认 Global:Z轴线已选中
- ▲ 选中 *Positive*

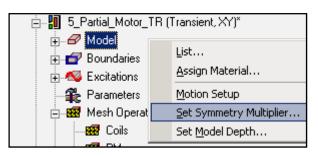
#### ▲ 在 Data 栏:

▲ 输入 *30 deg* 作为初始位置。 这样此同步电机在初始位置时A相轴线对应d轴。

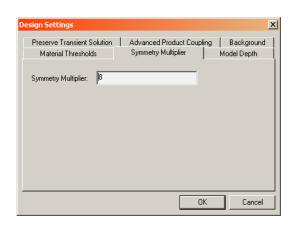


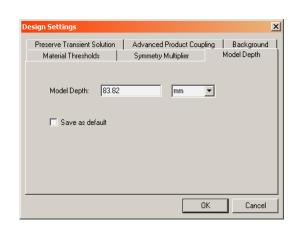


- ▲ 运动属性设置(续)
  - ▲ 在 Mechanical 栏:
    - ▲ 输入 *3000 rpm* 为速度值。
  - ▲ 点击OK确定Band部件的设置。
  - ▲ 用鼠标右键点击项目结构树中的Model,然后选择菜单项 Set Symmetry Multiplier



由于我们建立的是电动机的1/8 模型(模型跨度为 45°), 故输入 8°。 这样 转矩计算时就会将整个模型考虑在内。



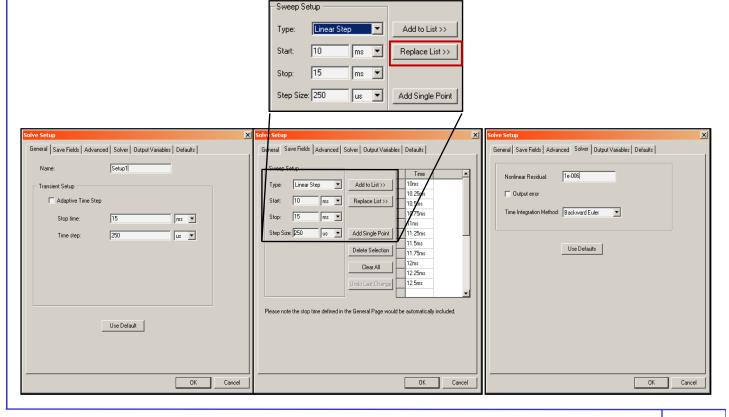


- 选中 *Model Depth* 栏。*Motoe depth* 设置为 *83.82mm* 。然后所有量都会被自动调整
- ▲ 接受设置



### ▲ 添加一个求解设置

- ▲ 用鼠标右键点击项目结构树中的 Analysis 并选择 Add Solution Setup:
  - 1. 在 *General tab* 中输入计算时间和步长。在转速为 3000 rpm时,一转用时 20ms(3000rpm表示每秒50转或者每转用时1/50秒)。为达到合理的精度 ,我们希望转动1到2度时计算一步。在这里为了更快地得到结果,我们设置 步长为*250 us*,这意味着每转动4.5度计算一次。
  - 2. 总仿真时间设为 15ms
  - 3. 在 Save Fields 栏
    - ▲ 选中 Linear Step
    - ▲ 开始时间设为 10ms
    - ▲ 停止时间设为 15ms
    - ▲ 步长设为 250us
    - 🗼 点击 Replace List
  - 4. 在 Solver 栏,设置 Non linear residual 为 1e-6。



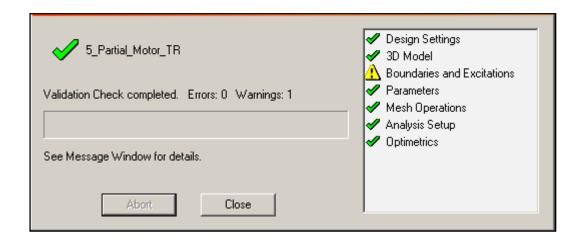


### ▲ 问题求解

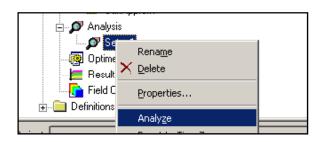
▲ 设置已完成。使用验证按钮检查项目设置



- Maxwell 将对几何图形,激励定义,网格剖分等等做检查。模型得到确认但会有以下警告出现在消息栏中:
  - ▲ 在我们所做设计中涡流效应没有考虑在内



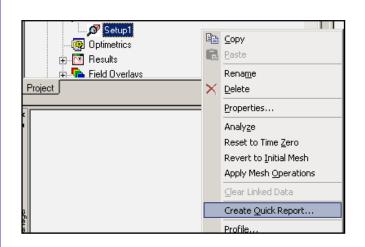
▲ 在项目结构树中选中 Analysis中的 Setup1, 点击右键选择 Analyse

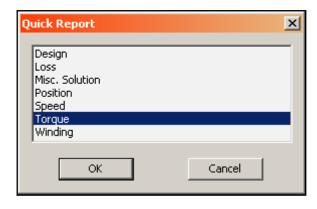




### ▲ 后处理

- 整个仿真用时大约几分钟。
- 在仿真的Profile图中显示有网格的大小。选择*Analysis Setup*,点击鼠标右键并选择*Mesh Statistics*即可显示剖分状态。在相关栏中有网格的统计数据。
- ▲ 在仿真期间可以显示特性曲线。
- Torque versus Time。选中项目结构树中的菜单项 Results,点击鼠标右键选择菜单项 Create Quick Report





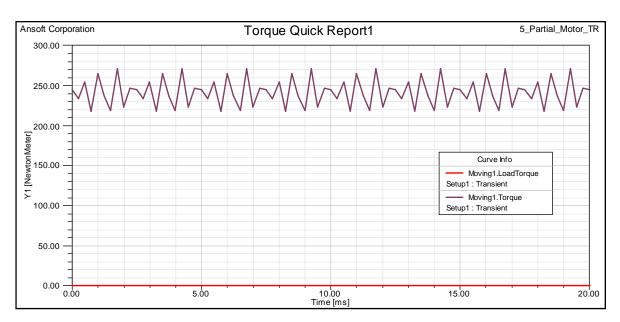
- ▲ 选择 Torque
- 对应于时间的转矩曲线显示出来。随着仿真的继续进行,可以用鼠标右键点击 *Torque Quick Report* 并选择 *Update Report* 来更新曲线。





#### ▲ 后期处理(续)

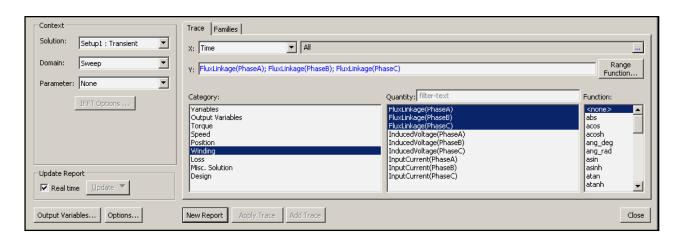
在仿真的最后得到转矩曲线如下所示



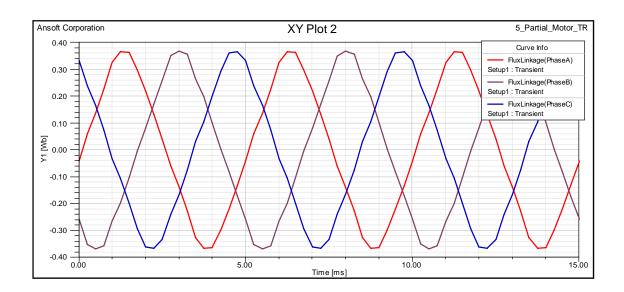
- ▲ 在电动机模式LoadTorque(红线所示)为零。
- 可以看出在转矩曲线中含有很多的纹波。转矩中的纹波分量差不多为10%。这是由IPM(内嵌式永磁电动机)独特的结构造成的。为了削弱纹波,一些厂家稍微修改永磁体部分的转子形状,也有添加第二层内置磁铁的。同时控制策略也会对削弱纹波起很大作用。
- ★ 转矩值大约为 240 N.m。这个值与测量值是一致的。
- 本设计中电机转矩峰值大约为 400 N.m
- Flux linkage versus Time。选中项目结构树中的菜单项 Results ,点击鼠标右键 ,选择菜单项 Create TransientReport > Rectangular Plot.



#### ▲ 后期处理(续)



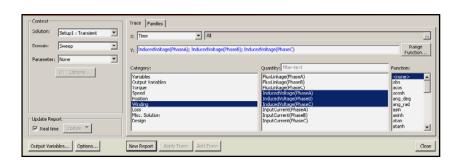
- 若要观察每个线圈的磁链的话:
  - 1. 在 Category 栏中选择绕组
  - 2. 在 Quantity 栏中选中 FluxLinkage(PhaseA), FluxLinkage(PhaseB), FluxLinkage(PhaseC)
  - 3. 点击 New Report
  - 4. 点击 Close

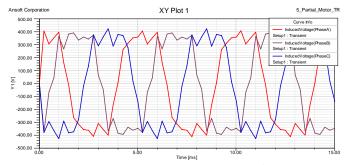




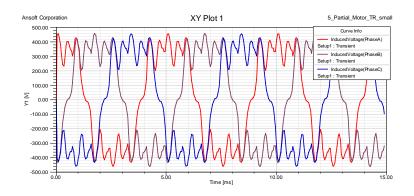
#### ▲ 后期处理(续)

- Induce Voltage versus Time。在项目结构树中选中菜单项 Results ,点击鼠标石键,选择菜单项 Create TransientReport > Rectangular Plot.
- ▲ 使用同样的方法绘制感应电动势波形





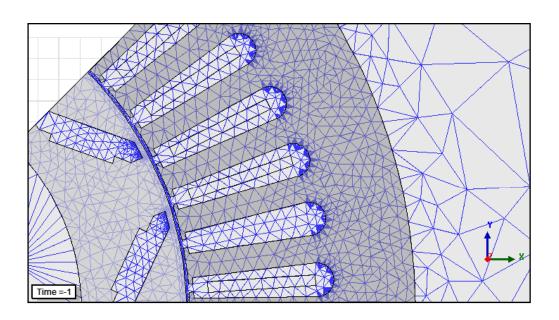
曲线并不平滑。这是由于步长太大了。由于感应电动势是一个导出量,在**Maxwell** 中需要从整体磁链推导得出,步长太大就会影响得到的感应电动势的精度。如果 以**50us**(而不是**250us**)为步长来做仿真的话,将会得到更为真实的感应电动势 波形。





### ▲ 后期处理(续)

▲ 绘制网格。 选中所有部件,点击鼠标右键点击 the Plot Mesh 按钮

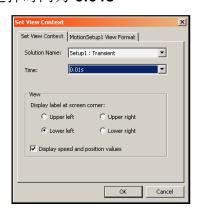


#### ▲ 绘制磁通密度

1. 选择菜单栏 *View > Set Solution Context* 或者双击模型窗口中的 "Time=-1" 图标



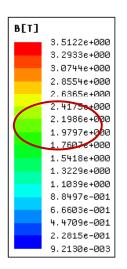
2. 从下拉菜单中选择时间为 0.01s

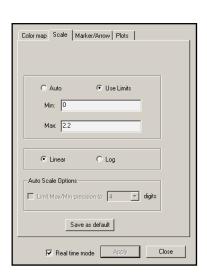




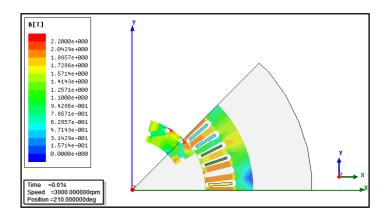
#### ▲ 后期处理(续)

- 3. 选中 Stator, Stator2, Stator3, PM1 和 PM2 。点击鼠标右键选择 Fields > B > Mag B
- 4. 接受设置
- 5. 0.01s时的磁通密度 B 的分布显示出来
- 6. 双击刻度尺区域改变刻度值





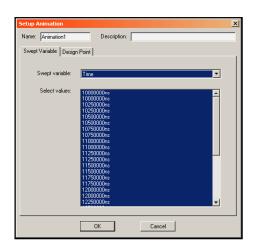
- 7. 在刻度尺选项中输入最小值0和最大值2.2
- 8. 关闭窗口



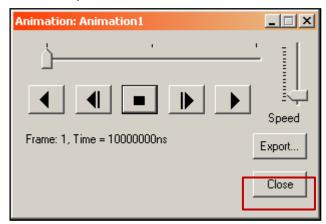


### ▲ 后期处理(续)

- **绘制磁通密度(动画)。**可以实现动画显示变化情况。选择 *Maxwell2D > Fields > Animate*.
  - ▲ 确定*sweep variable* 为 *Time*
  - ▲ 选择 time values
  - ▲ 确认设置



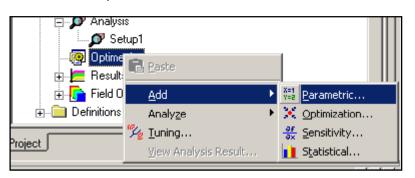
- ▲ 当各个位置片断都计算完毕就可以进行动画显示
- ▲ 可以在动画栏中通过 Export 按钮把动画导出去



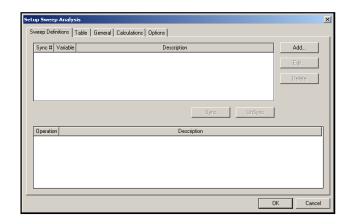


### ▲ 参数研究

- ▲ 以上研究是在20度功率角情况下进行的。如果改变功率角,仿真就需要重新开始
- ▲ 针对功率角在一个范围内扫描计算将耗费很长的时间,我们可以考虑以下两种途径:
  - 建立一个电动机的等效电路。这种方法需要结合使用静磁状态下参数扫描与路下仿真器Simplorer。在此我们不讨论这个方法。
  - 建立一个参数变化瞬态仿真。这要求使用 **Distributive Solve** 来分配仿真时间。在此我们选用这个方法。
- ▲ 点击项目结构树中的 Optimetrics 。点击右键,选择菜单项中 Add > Parametric



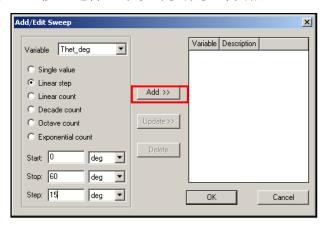
弹出参数设置面板



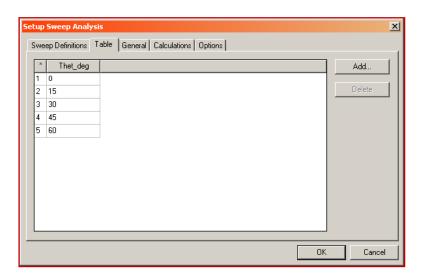


#### 参数研究(续)

点击Add 按钮选择一个设计参数参与扫描



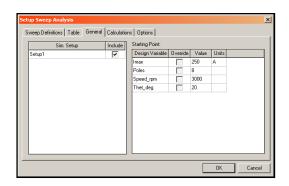
- 从下拉菜单中选择 Thet\_deg:
  - 1. 初始值为输入 O deg
  - 2. 终值为输入 60 deg
  - 3. 步长为输入 15 deg
  - 4. 点击 *Add* 按钮
- 选择'Table'栏,参数排列显示出来:

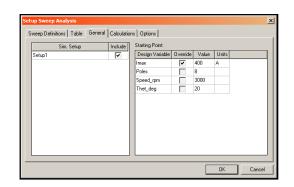




### ▲ 参数研究(续)

选中 *General* 栏。用户可以使用这个面板改变设计参数。例如,如果希望对峰值为 **400 A** 的电流进行扫描,选中 *Override*,改变电流值。

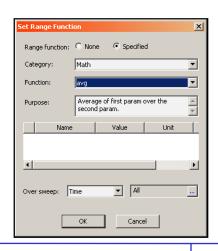




#### ▲ 选中 Calculations 栏

- 1. 选择 Setup Calculations
- 2. 在 Category 栏目下,选择 Torque
- 3. 在 Quantity 栏目下,选择 Moving 1. Torque
- 4. 点击 Range Function 按钮
- 5. 选中 Specified 选项
- 6. 在 Category 中选择 Math
- 7. 在Function下拉菜单中选择 avg
- 8. 点击 *OK*
- 9. 点击 Add Calculation
- 10. 点击 *Done*

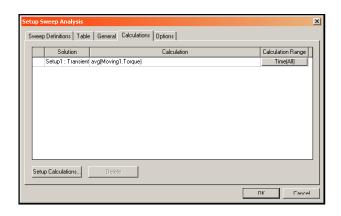




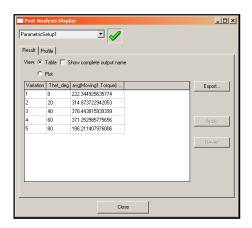


### ▲ 参数化分析(续)

ы 扫描设置面板中包含有期望值。



- ▲ 在 Options 栏,你可以选择保存每一次参数变化时的场量和网格剖分状态。
- ▲ 确定设置
- Run the parametric sweep. 为运行扫描,选择*Parametricsetup1*,点击右键选择菜单项*Analyse*
- Market Results. 右键点击 Parametricsetup1, 选择 View Analysis Result

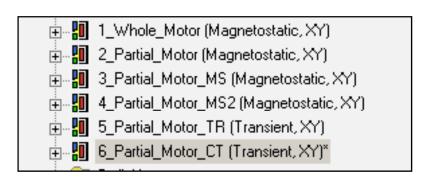


▲ 此时可以得到所有变化的曲线



# ▲ 齿槽转矩

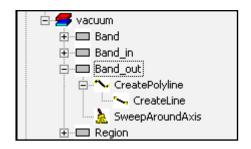
- 当线圈输入激励为**0**时,齿槽转矩即为由于齿槽和永磁体作用产生的转矩。这个转矩相对于整个负载转矩是一个很小的值。由于它的值与网格剖分带来的误差是相同数量级的,所以它的计算对网格剖分就比较敏感。
- 者要准确计算齿槽转矩,需要对参数每次扫描抽样做静磁计算(输入参数为定转子之间的夹角)。由于在每个不同位置时(每次网格都要重新剖分)由网格剖分引起的误差不同这种方法难以得到好的效果。
- 首推的方法还是使用能处理运动的 transient solver:
  - ▲ 以1 dea/s的速度转动转子
  - 由于Band的存在网格剖分将在所有位置保持不变:气隙带中的网格将随转 子一同旋转
  - ▲ 每个时间步之间都是独立无关的
  - ▲ 由于不必做自适应网格剖分,仿真时间要短一些
- ▲ 保存项目。点击Maxwell 的设计'5 Partial motor TR', 点击右键选择 'Copy'。
- 选中项目名称,点击右键选择 Paste。将复制过来的设计改名为 '6 Partial motor CT



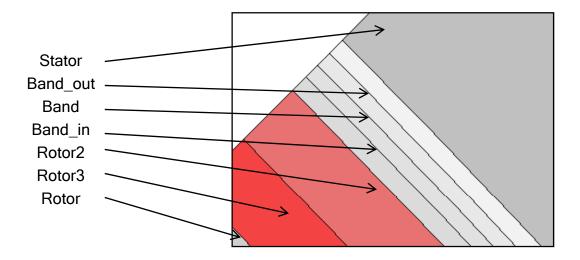


### ▲ 创建Band

- 同负载运行设置时一样对齿槽转矩计算进行设置,在对速度,激励和网格剖分等 方面要做一些改动。
- ▲ 由于气隙中的网格需要精细剖分,我们将在其中添加一层以获得足够的分层:
  - 1. 复制并粘贴部件 Band\_in
  - 2. 将 Band\_in1 重命名为 Band\_out。



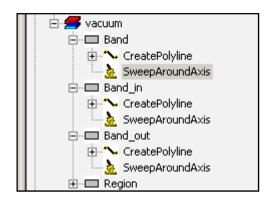
- 3. 展开Band\_out的结构树并修改下画线指令:
  - M 0, 0, 80.4 为 mm取代 80.4 ,0 ,0 mm
- ▲ 这将在气隙中创建出第三层





### 增加空气性质部件的分段数

- 在动态分析中, **Band** 和 **Band\_in** 剖分的每一段对应一度。为了降低网格剖分带来的误差,降低每一段的跨度。
- ▲ 展开**Band**, **Band\_in**和 **Band\_out**的结构树:
  - 1. 双击 Band 的 SweepAroundAxis 命令



- 2. 将分段数由45 改为 135
- 3. 对于Band\_in, Band\_out 重复1-2步

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	SweepAroundAxis		
Coordinate System	Global		
Axis	Z		
Angle	45	deg	45deg
Draft angle	0	deg	Odeg
Draft type	Round		
Number of Segments	135		135

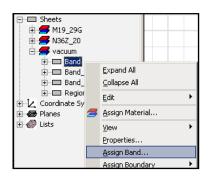


#### ▲ 网格剖分

▲ 我们需要重新设置 Band. 展开当前设计项目结构树,删除 MotionSetup1

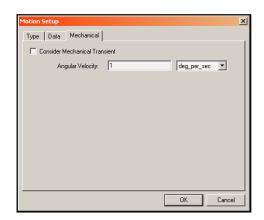


选择 Band,点击右键,选择 Assign Band



- ▲ 为运动设置输入以下参数
  - ▲ 在 Type栏,对 Motion Type选择: Rotation around Z axis
  - ▲ 保持 Data 栏不变
  - ▲ 在 Mechanical 栏, 输入 1 deg\_per\_sec
  - ▲ 确认设置

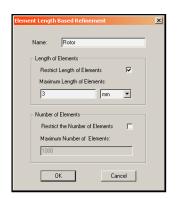


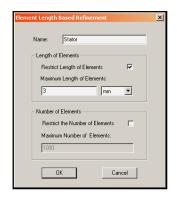




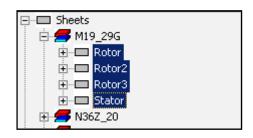
#### ▲ 网格剖分(续)

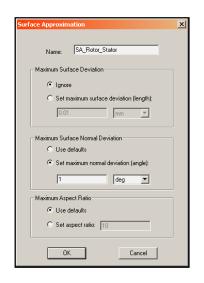
- 我们还需要对网格剖分做点改动。网格密度对于完整的负载转矩计算来说足够大,但在计算齿槽转矩时却难以保持足够高的精度。
- k 展开项目结构树,在网格剖分操作中,修改对*Rotor, Stator* 的网格剖分操作:
  - ▲ 把最大长度从**4mm** 改为**3mm**





- 选中 Rotor, Rotor2, Rotor3 和 Stator。点击右键并选择 Assign Mesh Operation > Surface Approximation
  - ▲ 命名网格操作 **SA\_Rotor\_Stator**
  - ▲ 设置 minimum normal deviation 为 1 deg
  - ▲ 忽略其他设置

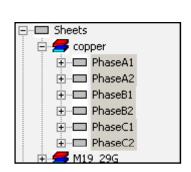


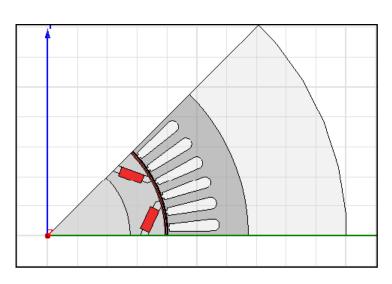




#### ▲ 进行分析设置

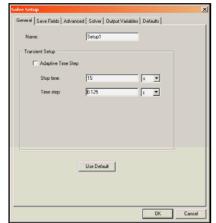
- ▲ 由于线圈在齿槽转矩仿真时不需要线圈,我们可以把它们删去。
- ▲ 选中6个线圈,删除





#### 展开分析设置进行修改:

- 一对极占**7.5**机械角度。为了计算两个周期我们需要 **15 s** 以上的时间(记住:转速为**1 deg/s**)
- ▲ 为了得到平滑的曲线我们把时间步长设置为*0.125 s*。如果你想更快得到结果的话可以把时间步长设的长些。
- ▲ 把 non linear residual 降低至 1e-4.
- ▲ 确认设置

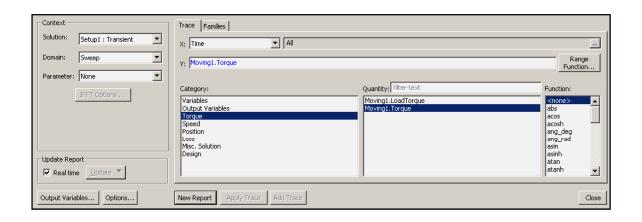






#### ▲ 分析

- ▲ 在项目结构树中,右键点击 Setup1,选择 Analyse.
- 解算需要若干分钟时间
- 在项目结构树中,右键点击 Results ,选择 Create Transient Report > Rectangular plot. 曲线绘制窗口弹出
  - ▲ 在 Category 栏选择 Torque
  - ▲ 在 Quantity 栏, 选择 Moving 1. Torque
  - ▲ 点击 New Report
  - ▲ 点击 Close



▲ 转矩曲线描绘出来了。和预想一样,齿槽转矩值是周期变化的,峰值大约为 *1.75 N.m*.

