

## 三维静磁场

Opera3D 使用 TOSCA 模块分析三维静电磁场。静磁场主要包括通电导体产生的磁场,铁磁物质作为二次场源产生的磁场,以及永磁体产生的磁场。对于静磁场的基本理论及求解方法,第 1.2 节已经进行了详细的介绍,这里不再赘述。本章将通过几个范例学习利用 Opera3D 对不同类型的静磁场进行分析。

利用 Opera3D 进行电磁场分析需要进行以下步骤:①建立待求解问题的几何模型;②定义模型各几何部分的最大网格尺寸等网格参数;③定义几何体的材料属性;④建立有限元网格;⑤设置求解模块的相关参数,进行求解计算;⑥计算后再进行后处理,求得待求空间的场值,生成视图或表格。

### 3.1 三维静磁场分析范例——永磁 MRI

知识要点:

- 利用 Opera3D 进行电磁场分析的建模、求解及后处理的基本流程;
- 利用 Opera3D 提供的基本几何实体进行几何建模;
- 后处理进行磁场计算和电磁力计算。

模型介绍:

本范例为一个简化的核磁成像磁体(magnetic resonance image, MRI)模型。如图 3.1.1 所示,磁体包括一个由四根方柱及一对平板组成的框架,用于支撑磁体和形成磁回路。一对圆饼形永磁体分别固定于框架上下的平板上,用于产生磁场。每个永磁体上分别固定有一个磁极和一个匀场环,用于改善磁场的均匀度。磁体框架、磁极和匀场环由铁磁材料制成,永磁体由永磁材料制成。

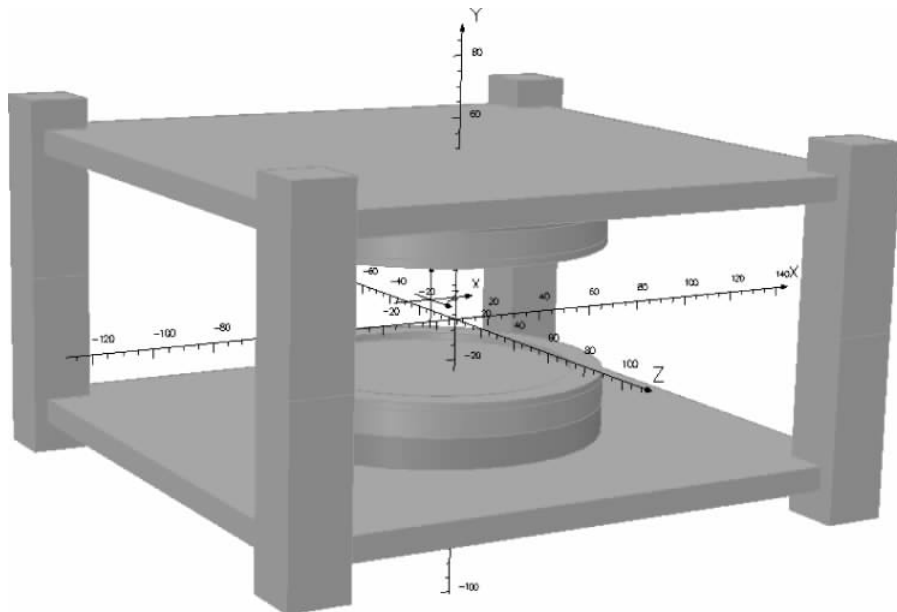




图 3.1.1 简化的核磁共振磁体模型

### 3.1.1 几何模型建立

通过 Opera Manager 打开 Modeller 之后(参见 2.2 节),首先建立永磁体。永磁体的几何形状是一个简单的圆柱体,柱体高 10cm,半径 57cm,柱底面圆的圆心距原点 32cm。在建立圆柱实体之前首先要使工具栏中的素描按钮  处于未选中状态,否则会在主窗口出现用鼠标选点的情况而无法输入参数。单击工具栏的圆柱实体创建按钮 ,在弹出的圆柱实体创建对话框中填入数据,如图 3.1.2 所示。

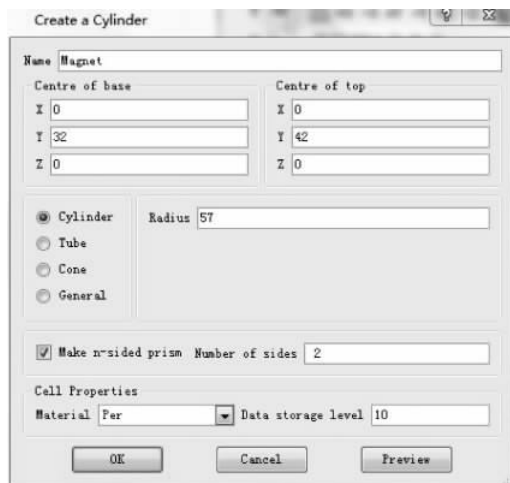


图 3.1.2 圆柱实体创建对话框一

在 Name 文本框输入自定义圆柱实体的名称 Magnet, 一个标准圆柱体 Cylinder 由上底圆心 Centre of top、下底圆心 Centre of base 及圆半径 Radius 定义; 图中 Make n-sided prism 选项代表将该圆柱体(或圆锥等)改为  $n$  边形, 但如果  $n$  为 2, 则代表只是为了网格划分之便而将该圆柱体进行 1/2 剖分; Data storage level 文本框用于设置材料特性的级别, 级别越高, 当两种材料所在的几何模型相交后, 相交区域的材料特性将采用级别最高的那个, 这里设定为 10; Material 下拉列表框中输入任意给该材料取的名字, 在后续步骤中具体指定材料参数, 这里材料名称取 Per。单击 OK 按钮, 主窗口如图 3.1.3 所示。

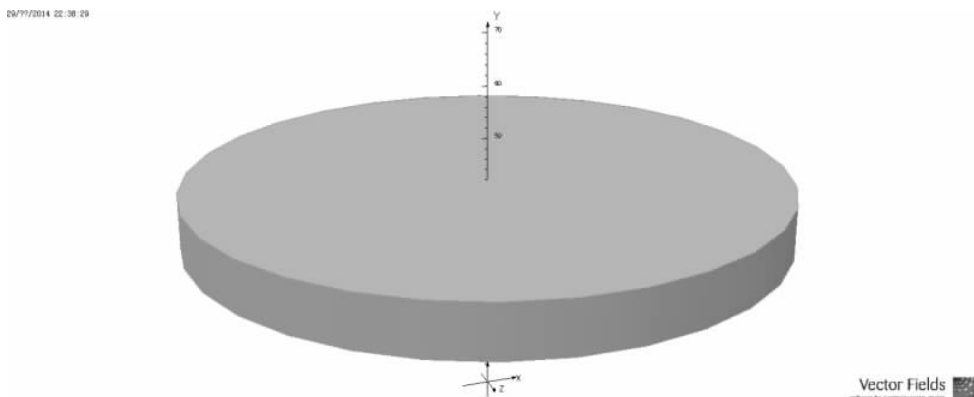


图 3.1.3 创建的圆柱实体

然后建立匀场环和铁磁极。按照如上相似的圆柱体方式建立圆柱形匀场环和磁极。匀场环是一环状体, 所以在圆柱实体创建对话框中选择 Tube 选项, 如图 3.1.4 所示, 其半径 57cm, 径向厚度 10cm, 轴向宽度 2.5cm。这里需要注意的是对话框中 Radius 是外半径, 内半径由外半径减去径向厚度 Thickness 得到。这里材料特性与之前不同, 为铁磁材料, 设为 Fer。



图 3.1.4 圆柱实体创建对话框二

单击 OK 按钮,主窗口如图 3.1.5 所示。

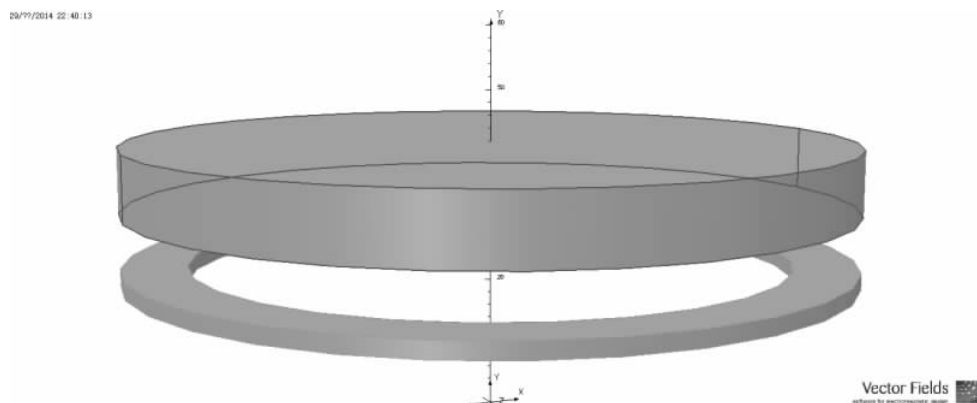



图 3.1.5 创建的圆环实体

磁极为一简单圆柱体,按照图 3.1.6 所示输入参数即可。



图 3.1.6 圆柱实体创建对话框三

单击 OK 按钮,主窗口如图 3.1.7 所示。

建立磁体支撑框架。框架由 1 对平板及 4 根方柱脚组成。单击工具栏中的方块实体创建按钮 ,弹出如图 3.1.8 所示方块实体创建对话框。在对话框中按照图示输入参数,自定义名称为 Leg,方块由立方体对角线上的两个顶点 First corner 和 Opposite corner 定义,输入两个顶点的直角坐标值,输入材料参数名为 Fer,即与磁极一样的材料。

单击 OK 按钮,主窗口如图 3.1.9 所示。

完成平板的几何建模后,再按照图 3.1.10 所示完成 1 个方柱脚的几何建模。

单击 OK 按钮,主窗口如图 3.1.11 所示。

由于 4 根方柱脚是周期对称分布的,因此可以用复制命令完成剩余 3 根的几何建模。双击已建好的方柱脚即选中该方柱脚(选中后高亮,默认变为橙色),然后在工作区内任意点按鼠标右键,或者直接右击方柱脚,然后在弹出的快捷菜单中选择 copy 选项,弹出实体变形

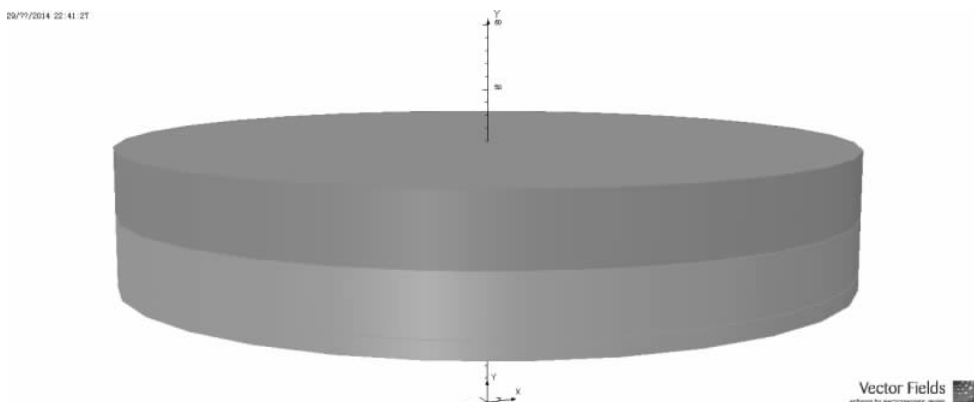


图 3.1.7 创建的圆柱实体

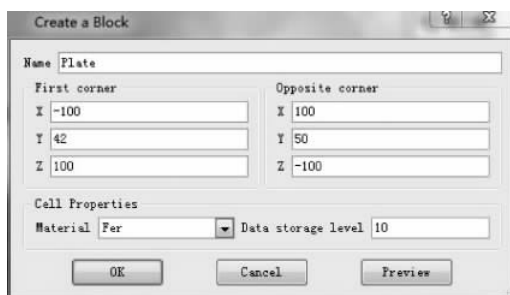


图 3.1.8 方块实体创建对话框

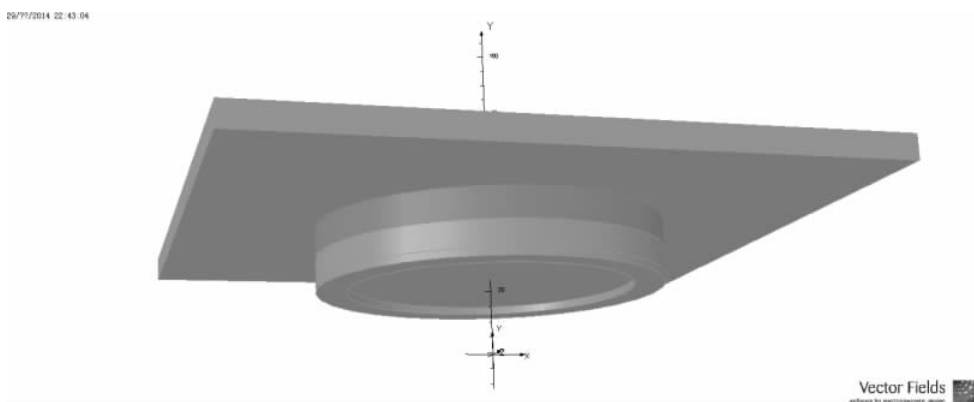


图 3.1.9 创建的方块实体

设置对话框,如图 3.1.12 所示。在对话框中选择 rotate 选项旋转,即复制是按照绕某一坐标轴旋转方式完成的;UVW 用于定义旋转轴,如果该轴被选中,即输入 1,否则输入 0,这里绕 y 轴旋转,则在 V 中输入 1,其他两栏中输入 0;Angle 为复制一次旋转的角度,这里为  $90^\circ$ ,number of copies 选项为复制的个数(不包含被复制体本身),这里输入 3,即复制 3 根方柱脚。按照图示输入参数后,单击 Apply 按钮应用或 OK 按钮确定,完成复制。也可以单击 Preview 按钮,即先预览显示复制内容,此时被复制的 3 根方柱脚默认显示为蓝色,通过改

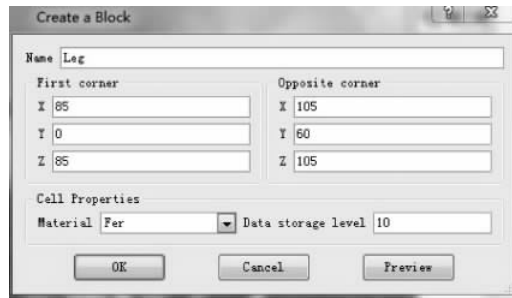


图 3.1.10 方块实体创建对话框二

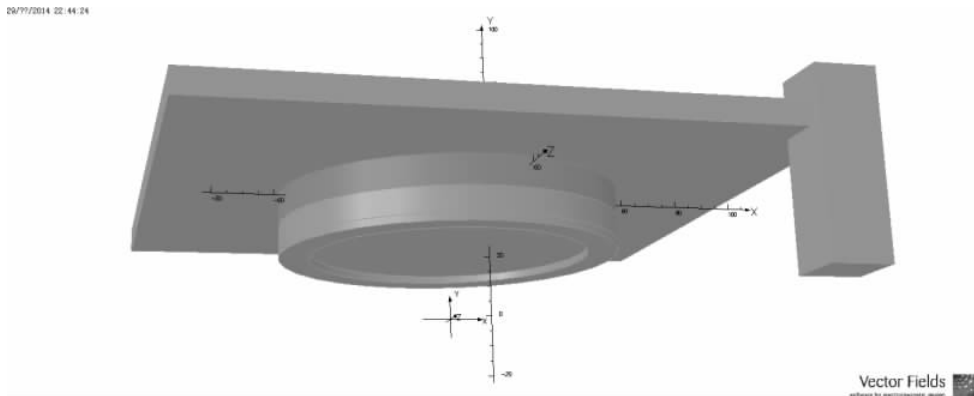


图 3.1.11 创建的方块实体

变参数还可以进一步调整。除了按照旋转 Rotate 的方式复制,还可以按照沿某个方向平移 Distance,或沿某一平面镜像 Reflect 等方式复制,读者可以自行尝试或参考《Opera-3d Reference Manual》。

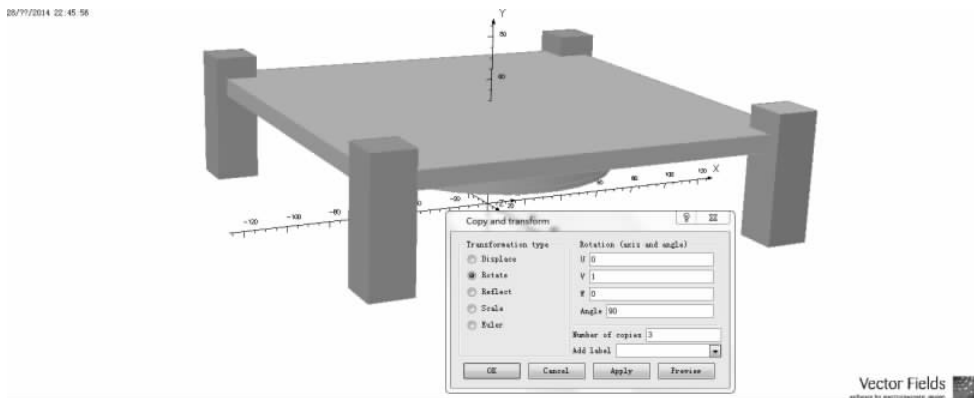


图 3.1.12 实体变形设置对话框及方块实体复制

在完成框架平板和 4 根方柱脚的几何建模后,发现方柱脚与平板有部分重叠的,为此需要将二者联合起来形成一个实体。分别双击支撑板、4 根方柱脚,即选中这 5 个实体(选中后高亮),然后单击菜单栏 Operation→Combine Bodies→Union without regulation 命令,

如图 3.1.13 所示,这样这 5 个部分就形成一个整体,此时再双击这实体的任意部分,即选中 5 部分的整体。在菜单中,Union without regulation 即这几个实体联合为一体后,它们相交部分的交线、交面还在联合体内保留着,好处是便于之后的有限元网格划分;而 Union with regulation 则使联合后这些交线、交面也消失,此命令是当联合的不同实体具有不同的材料参数时,新的联合体选择具有更高 storage level 的实体材料参数。

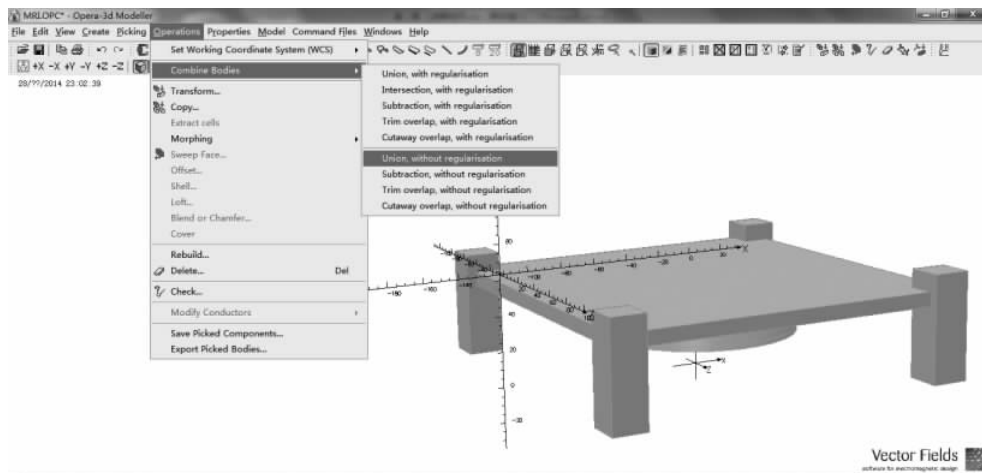







图 3.1.13 实体组合命令

由于本模型几何结构及磁场分布是关于  $zx$  平面对称的,这里几何建模仅建立一半即可。实际上,该几何模型和磁场分布还关于  $xy$  平面、 $yz$  平面对称,因此仅建立  $1/8$  模型即可。以上为便于读者学习和操作,建立了  $1/2$  模型。在后面还将设定计算模型为  $1/8$  模型,即实际上 Opera3D 只计算该 MRI 磁体的  $1/8$  部分。

### 3.1.2 指定实体属性

定义完模型的几何参数后,就需要指定模型中各实体的属性参数。单击工具栏中的实体选择按钮 ,该功能用于在屏幕上选择模型中的单元实体,关于单元实体和体的说明参见 2.1 节。其他工具按钮是用于选择体元 cell 、面 face 、边 edge 、顶点 vertex  等实体的,例如用于加密网格,这里暂不使用。双击屏幕上的永磁体 Magnet,使其高亮。鼠标右击主窗口空白处弹出快捷菜单,选择 Cell Properties 选项,如图 3.1.14 所示。

在弹出的实体属性设置对话框中,按照图 3.1.15 所示填入数据。

对话框中的属性说明如下。

- Material label 是标识此几何实体的材料名称,与几何建模的参数是一样的。材料的具体属性函数需要在后面设定。
- Potential type 是矢势计算类型的选择。对于不同类型的实体选择不同的计算类型,有助于计算结果的准确性。例如对于不含线圈的区域用 total potential,但一般选择 Automatic 让程序自动选择即可,相关设定可参照《Opera-3d Reference Manual》。
- Volume data label 框中填入一个识别名,可在后续的 Volume 设置中指定永磁体的

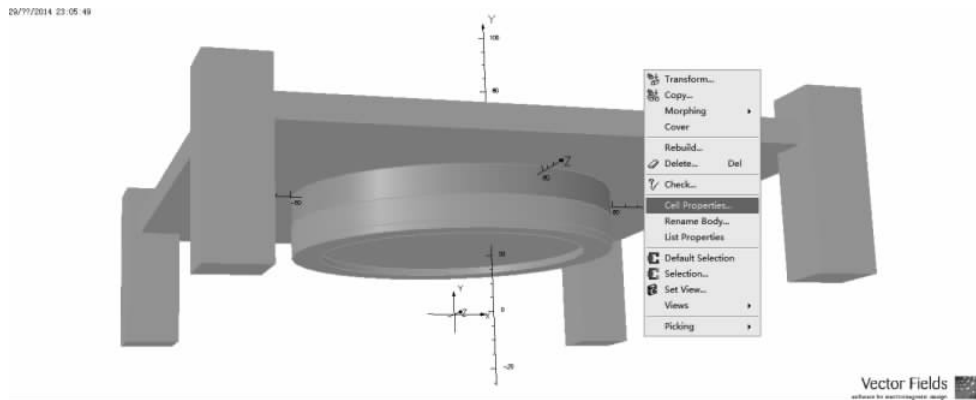


图 3.1.14 实体属性设置命令

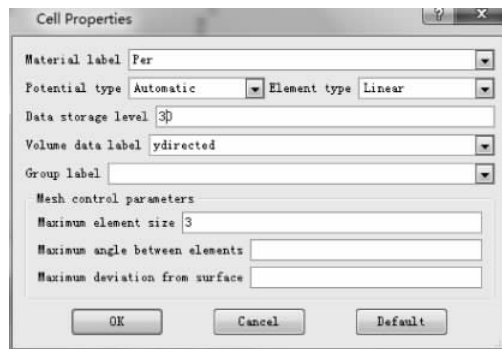


图 3.1.15 实体属性设置对话框

磁化方向。

- Volume 用于设置体特性参数，它可以用于其他 Opera3D 模块，例如直线电机模块中对运动部件指定速度等。永磁体的磁化方向和强度还可以通过其他方式设置，比如在设置物质材料属性时规定不同方向的剩磁。
- Group label 为一个或多个实体设定标识名称，便于多个实体的同时选取操作等功能。初学者可以暂不使用它。
- Mesh control parameters 用于网格划分参数设定。其中最主要的参数是 Maximum element size，用于设置该实体中有限单元的最大尺寸。尺寸的选择很重要，太小了会使计算过于耗时，太大了会使计算精度太差。另一方面，相接触的实体或空气如果网格划分缺少过渡，也就是网格尺寸差异过大，会导致网格难以生成，因此需要反复调节网格划分参数，包括另外两个参数：两单元间最大夹角 Maximum angle between elements 和最大面偏离度 Maximum deviation from surface。这两个参数是用有限单元体，如四面体，描述几何模型中曲面时所用参数，它们决定如何使有限单元拼接起来后更加反映真实曲面，同时控制曲面上四面体的形状，相关介绍详见《Opera-3d Reference Manual》，对于初学者，这两个参数可以暂时忽略。最后一个是选择有限单元形状 Element shape preference，一般来说，选择四面体为该几何实体的有限单元体是最常用的，其他几种类型，如六面体-金字塔单元 MOISAC，有时

会使计算更快、更准确,但这需要用户根据磁场分布的定性判断决定,否则反而会降低计算速度和准确性。因此对于初学者,选择四面体即可。

设定磁体的实体属性参数后,再设定匀场环磁极和支撑框架的属性参数。根据图 3.1.16 所示,设定匀场环的属性参数,由于匀场环相对其他部分的体积较小,而且靠近磁体中心的均匀区,对磁场均匀度影响较大,其有限元建模的最大尺寸应设定得小一些,这里设为 2。

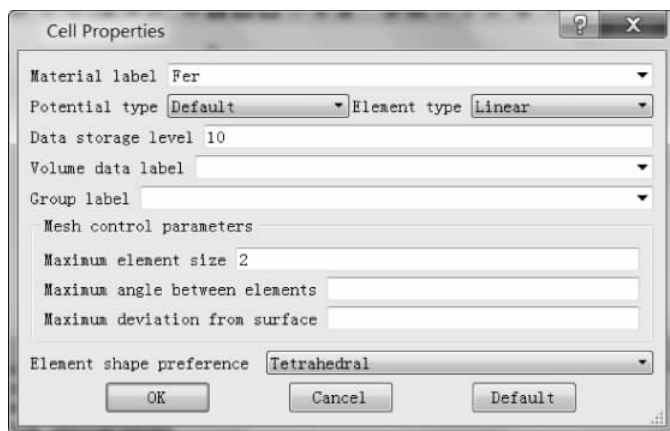


图 3.1.16 实体属性设置对话框

根据图 3.1.17 所示,设定支撑框架的属性参数。由于支撑框架体积较大,且距离磁场中心均匀区较远,对均匀区磁场贡献较小,其有限元网格最大尺寸设定得大一些,这里设为 5。

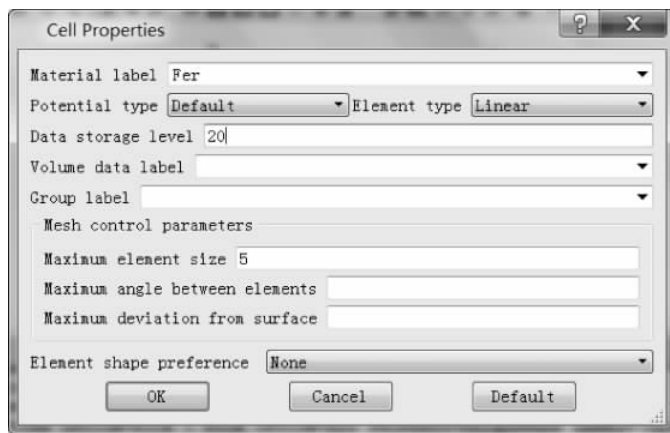


图 3.1.17 实体属性设置对话框

### 3.1.3 解算模块设置

本例中仅计算永磁体和铁磁体产生的磁场,因此需要指定 TOSCA 模块进行计算:单击菜单栏命令 Model→Analysis Type→TOSCA Magnetic。只有当这一命令指定后,以上这些对话框中的一些内容才会显现。

设置完解算模块后, Model 菜单栏的内容会进行相应的调整显示可用的菜单内容, 便于相关参数的设置。这里选择 TOSCA Magnetic 模块后, 可以单击 Model → TOSCA Magnetostatics settings 命令在图 3.1.18 所示对话框中进行 TOSCA 模块的相关参数设置。图中左上角区域用于选择线性或非线性材料设置, 如果这里选择线性特性 Force linear properties, 那么下述关于铁磁材料 BH 函数中, 则只选取第一个点作为线性参数; 如果选择非线性 Use nonlinear properties, 那么计算时会根据材料的 BH 函数进行迭代求解; 此时对话框右侧选取迭代参数设置, Newton-Raphson update 选项计算更为准确, 但是会更耗时, 一般选取 Simple update 即可; 其他参数一般按照图 3.1.18 所示的内容输入即可。

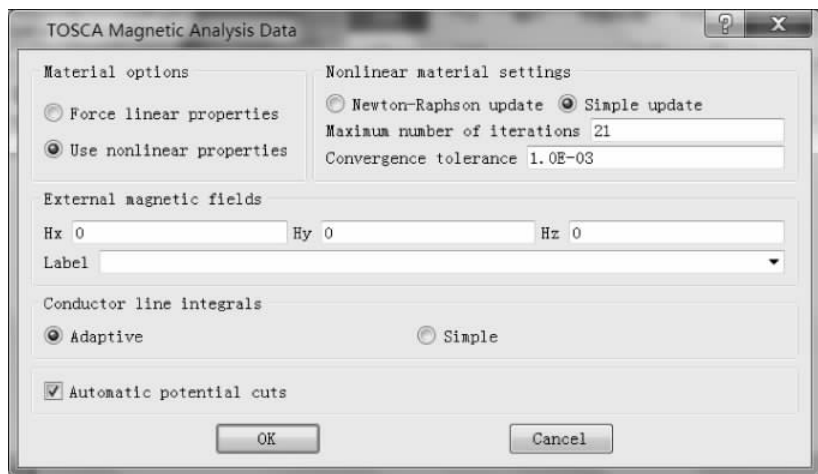


图 3.1.18 TOSCA Magnetostatics 模块设置对话框

### 3.1.4 设定材料参数

前面对各实体标识了材料名称, 下面对材料的具体特性进行设置。单击菜单栏命令 Model → Set Material Properties, 弹出如图 3.1.19 所示的材料特性设置对话框。在左下角是数值单位的选择, 这里单位仅是显示此对话框中参数用的, 对于模型中几何参数的单位在后述最后一步建立解算数据时设定。前一小节中的每一种材料名称, 左侧栏中都有显示, 选中任一个进行参数设置, 设置完再选中下一个。以 Fer 材料为例, 单击 Fer 后, 在右侧可以看到材料的一些电磁参数: 磁导率选项 Permeability options, BH 曲线函数选择等。本例是一个纯磁场计算问题(上一小节模块设置中选择了 TOSCA Magnetic), 因此其他无关参数, 如电导率等就没有在这个对话框中显示。选择非线性磁导率 Nonlinear, 选择各项同性 Isotropic, 设定 BH 函数名称 Default。

Default 是 Opera3D 默认的 BH 曲线。读者可以使用自己编写的 BH 曲线。为此, 需要在设定材料参数前编写或加载已有 BH 曲线。这里设定或选择的是 BH 的函数名称, 而 BH 函数需要在菜单栏中单击 Model → Set BH Curve Properties 命令定义, 打开 BH 曲线设置对话框, 如图 3.1.20 所示。

对话框左侧列出已经定义过的 BH 曲线; 右侧可以对 BH 函数进行建立 Add、数据列表 List、曲线显示 View、编辑 Edit 或者删除 Delete 等操作。这里添加一个新的 BH 曲线,

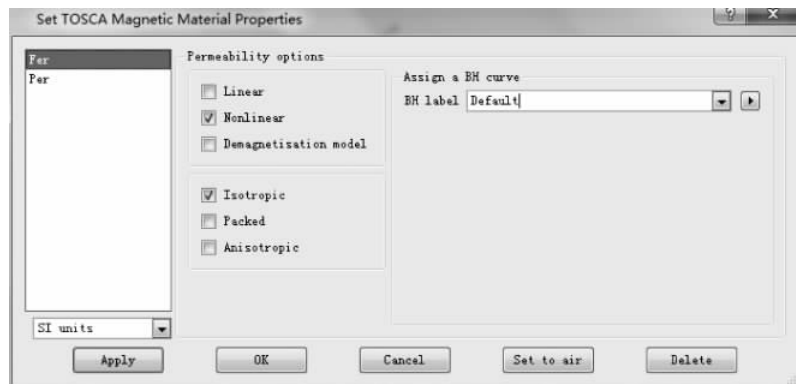


图 3.1.19 材料特性设置对话框

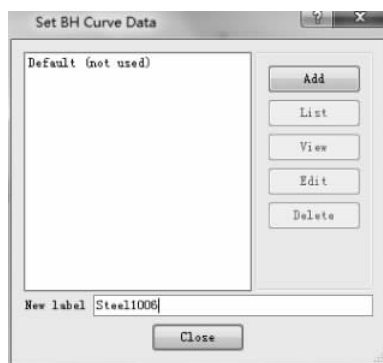


图 3.1.20 BH 曲线设置对话框

先在 New label 文本框中输入材料名称,如图中的 Steel1006,然后单击 Add 按钮进行添加,弹出如图 3.1.21 所示的 BH 函数定义窗口。

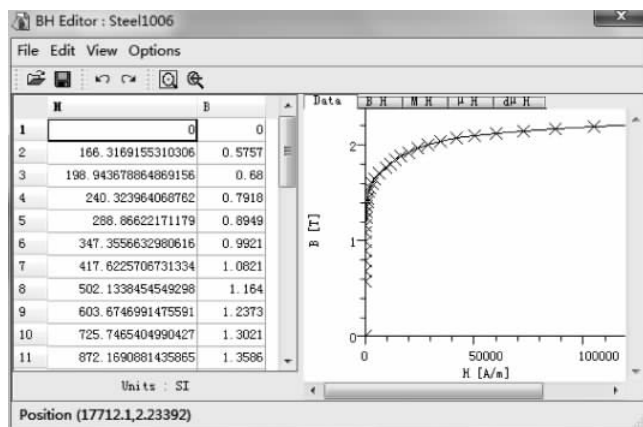


图 3.1.21 BH 函数定义窗口

读者可以自己进行  $B$  值和  $H$  值的参数输入,每一行第一个为磁场强度  $H$  值,第二个为磁感应强度  $B$  值。注意数据的单位,可以在 Options 下拉菜单中设置。此外,需要至少 5 个

点参数才能构建一个 BH 曲线。如果前面选择的不是非线性 nonlinear 而是线性 linear, 那么 Opera3D 将采用 BH 曲线值的第一个点的  $B$  值和  $H$  值为线性磁导率的计算参数。需要注意的是, BH 曲线应该尽可能长, 在 BH 的结尾也就是深度饱和区, 如果计算中的磁场强度  $H$  值超过所提供的范围, 那么 Opera3D 将选取 BH 曲线上最末一个点的值, 该点的值有可能对最终计算结果有较大影响。输入完 BH 数据后, 选择 File→Export 选项, 将数据保存到文件中, 文件后缀名默认为 .bh。读者可以自己输入 BH 曲线, 也可以读入某一已经编辑好的 BH 文件, 文件格式见安装目录下/bh/目录里的任意一个 bh 文件, 该文件可以用 Windows 的记事本打开, 并直接在记事本中输入或修改数据。设定好新的 BH 参数后, 可以重新指定材料特性, 如前所示, 单击菜单栏命令 Model→Set Material Properties, 打开材料特性设置对话框, 选择 BH 曲线为 Steel1006, 如图 3.1.22 所示。

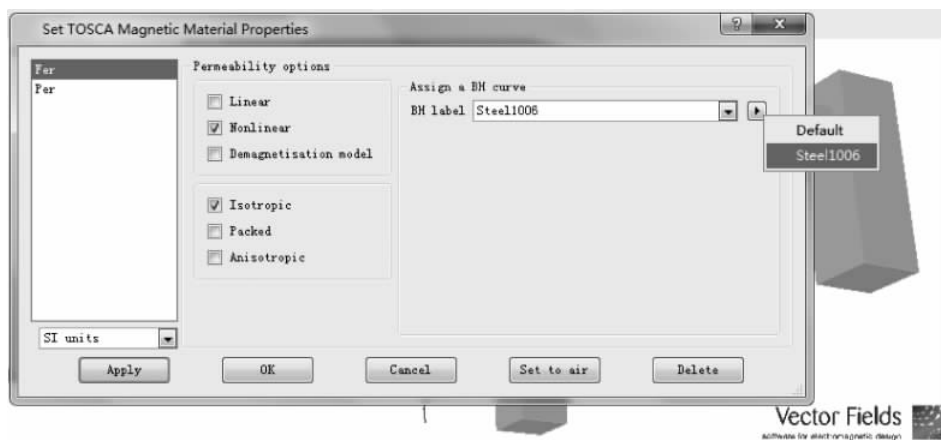


图 3.1.22 材料特性设置对话框

设定永磁材料 per 的参数: 首先设定永磁材料的剩磁。方法是单击菜单栏命令 Model→Set Material Properties, 弹出如图 3.1.23 所示对话框, 在其左侧窗框中选择 Per, 在右侧输入剩磁  $H_c$ 。



图 3.1.23 材料特性设置对话框

然后设定永磁体的磁化方向,单击菜单栏命令 Model→Set Volume Properties,弹出如图 3.1.24 所示的体特性设置对话框。

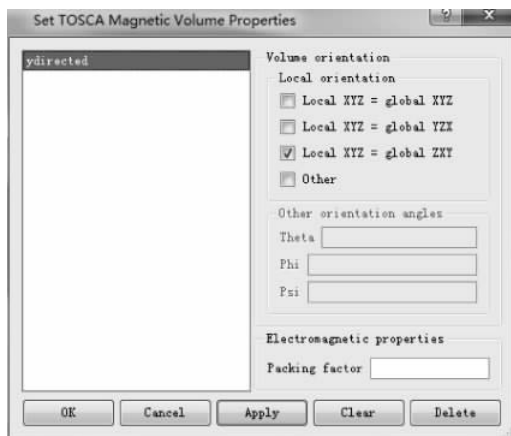


图 3.1.24 体特性设置对话框

Opera3D 默认永磁体的磁化方向为  $z$  向,由于本模型是  $y$  向,因此需要选中 Local XYZ=global ZXY 选项,即将默认的  $z$  向变为本例的  $y$  向;如果是其他方向,则选择 Other 选项,并输入对应的 Theta,Phi,Psi 等角度定义该方向。选项 Packing factor 用于在交流模块里设定多片层叠永磁体内层隙占空比,这里可以忽略它。

### 3.1.5 设定边界条件或对称性

一般来说,有限元的外围无穷远,但是在建模时一般设为原有几何模型尺寸的几倍大小就足够。单击菜单栏命令 Model→Model Symmetry,弹出如图 3.1.25 所示的模型对称性设置对话框。

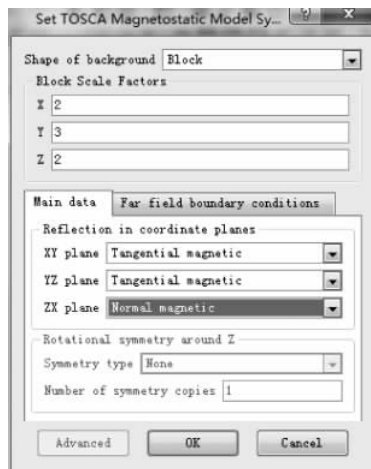


图 3.1.25 模型对称性设置对话框

Shape of background 选项用于设定外围空气域的形状。一般来说,空气域的边界与磁场相切有利于计算结果的准确性,根据这一原则及对磁场分布的定性分析,可以为空气域选

定形状。本例中,支撑框架大致是方形的,因此这里设置外围空气域形状为方块 Block。其他形状读者可以自行尝试,并对计算结果进行比较。选择 Block 后,需要设置 Block 的尺寸。Block Scale Factors 选项区用于设定  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上,Block 与模型几何尺寸(即模型在某方向上占据的最大范围)之比。

一般来说,无须对空气域的外围边界进行特别设定(Far field boundary conditions),Opera3D 会自行设定。需要读者自己设定的是几何模型的磁场对称性。当磁场关于某一坐标轴平面( $xy$  平面、 $yz$  平面或  $zx$  平面)对称时,如果磁场垂直于该平面,那么满足法向对称性 Normal magnetic,如果磁场平行与该平面,那么满足切向对称性 Tangential magnetic。对于本例,磁场关于 3 个坐标轴平面都对称,即实际仅计算 1/8 模型即可。根据图 3.1.25 所示选择相应的对称边界条件。注意,背景空气域的大小是根据满足对称性之后的 1/8 模型定义的。

除了以上两种对称性,周期对称性是在 Rotational symmetry around Z 中选择 Tangential magnetic,即磁场在周期面上(经过  $z$  轴的平面)是切向相同的; Number of symmetry copies 用于设置周期个数,Opera3D 允许最大周期个数为 512,实际计算时,即将整个圆周  $360^\circ$  分为周期个数个部分,而只计算其中的 1 个部分,由此可以大大缩短计算时间;周期个数一般也不宜设计太小,否则有限元模型周向上太薄,反而需要加密径向和轴向上的网格以减少生成差质量的体网格(即网格形状不宜扁平)。详细设置可参考《Opera-3d Reference Manual》。

### 3.1.6 建立有限元网格和生成解算数据进行解算

至此,该模型的基本物理参数都已设置完成,之后便是有限元网络的建立和解算设定。在生成有限元网格之前,需要先将所有模型内的实体包括空气域生成一个体 Body,方法是单击菜单栏命令 Model→Create Model Body,生成模型体如图 3.1.26 所示。此时,模型的几何特性无法再修改,但可以对实体的网格划分进行参数设定。

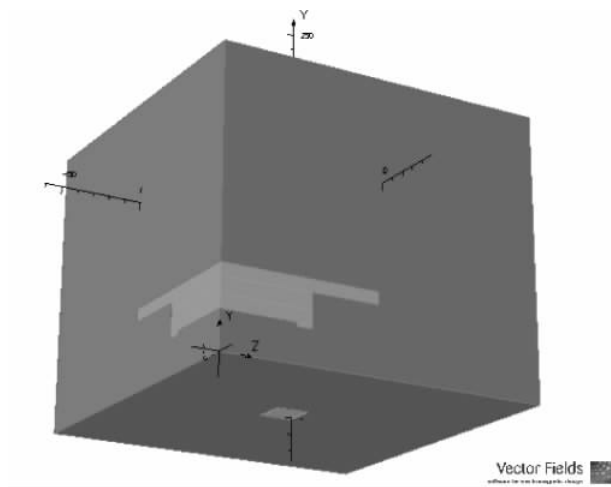


图 3.1.26 模型体生成

然后,生成面网格,方法是单击菜单栏命令 Model→Generate Surface Mesh,弹出如图 3.1.27 所示的全局面网格设置对话框。对话框中的内容与实体中网格划分参数的含义相同,只是这里是全局设置。如果某实体没有设置其网格参数,如最大网格尺寸,那么其网格划分将自动采用此处的全局参数。此外,背景空气域采用此全局参数划分网格。

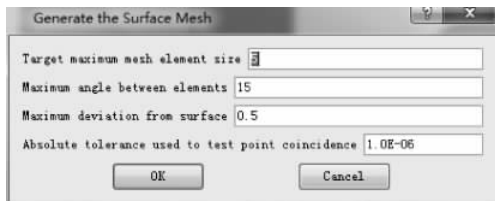


图 3.1.27 全局面网格设置对话框

单击 OK 按钮,主窗口便进行面网格划分,如图 3.1.28 所示。

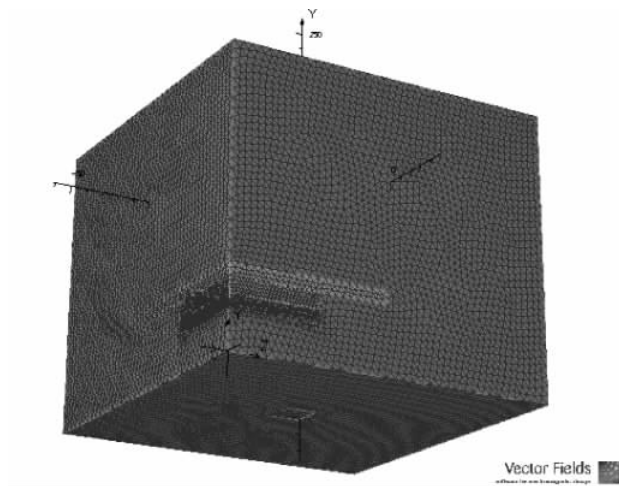



图 3.1.28 有限元面网格生成

生成面网格之后,Opera3D 根据已划分的面网格进行体网格划分。单击菜单栏命令 Model→Generate Volume Mesh,弹出如图 3.1.29 所示对话框。对话框中的参数代表网格生成过程空间两点的尺寸辨别误差,此参数越小,代表体网格划分越能辨识小体积的几何体,体网格建模成功率一般也更高,一般可设为  $1.0E-08$ 。单击 OK 按钮后,生成体网格,此过程时间会比面网格建立的时间长,生成后主窗口内模型显示与面网格建立后的相同。如果生成体网格的时间过长,可能是局部网格质量太差的缘故,此时可中断 Opera3D 的体网格生成过程。方法是单击工具栏中的  按钮(仅在面网格或体网格生成过程中显示红色时才可单击),即可终止体网格的生成过程而不必等其最终报错。

面网格和体网格的建立有时可能会不成功,此时就需要多次调整网格划分参数。对于初学者,有时改变最大网格尺寸、网格类型等参数即可成功建立体网格,对于进阶的学习,有时还需要建立空气过渡区域、调整实体过渡区域,以便网格大小在空间内变化不过快,从而建立更高质量的体网格。每次改变网格参数后,即可重新生成面网格和体网格,并在视图上观察网格密度或形状的变化情况。

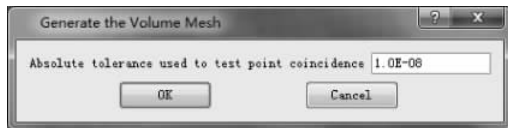


图 3.1.29 体网格设置对话框

最后,生成解算数据用于求解。单击菜单栏命令 Model→Create Analysis Database,弹出如图 3.1.30 所示解算数据生成对话框。

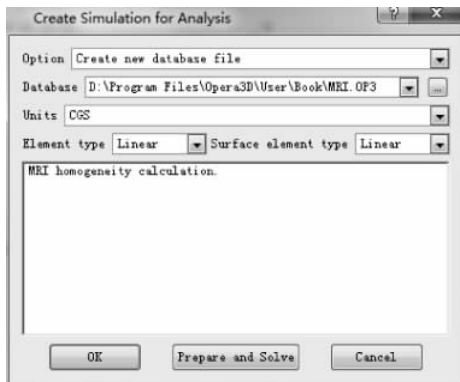


图 3.1.30 解算数据生成对话框

解算数据的文件后缀名为 .op3,需要在 Database 中指定,在生成解算数据文件同时,也会生成同名称的模型数据文件,后缀名为 .opc。对话框中,Units 可以选择标准单位 SI 制或者 CGS 制等,这里选择的单位即代表了模型中几何坐标的单位,关于 CGS 单位制请参照《Opera-3d Reference Manual》或相关资料;体单元类型 Element type 及面单元类型 Surface element type 一般选择 Linear 即可,其他 mixed 或者 curved 选项使单元类型包含二次单元,即有限元单元内的形函数是非线性且是二次曲线形式的,这类单元计算精度更高些;但是计算更加耗时;对话框中的下面窗口中可输入相关注释。

单击 Prepare and Solve 按钮后,Opera3D 会生成解算文件,然后自动调用解算程序进行解算,解算完成后生成后处理文件,覆盖原解算文件,即与解算文件同名;如果单击 OK 按钮,只生成解算数据文件,可供今后需要时再进行解算(在 Opera Manager 窗口中,鼠标右键单击该解算数据文件,在快捷菜单中选择 Solve 解算)。模型数据文件 .opc 生成后,今后便可以直接打开,进行如上的几何模型建立、解算模块设置、网格划分生成等操作,从而调整或改进模型。

单击 Prepare and Solve 按钮后(如果弹出是否改写 Overwrite 询问对话框,单击 OK 按钮即可),Opera3D 会打开解算报告窗口,如图 3.1.31 所示。窗口内动态显示解算时间、迭代步骤和计算误差等解算信息,供读者参考。这些解算报告会自动保存在同目录下的 .res 文件中。解算报告窗口是否显示可以在 Opera Manager 窗口里设置。

### 3.1.7 后处理

解算完成后,解算报告窗口会停止更新内容,单击 Post-Process 按钮,此时 Opera3D 调

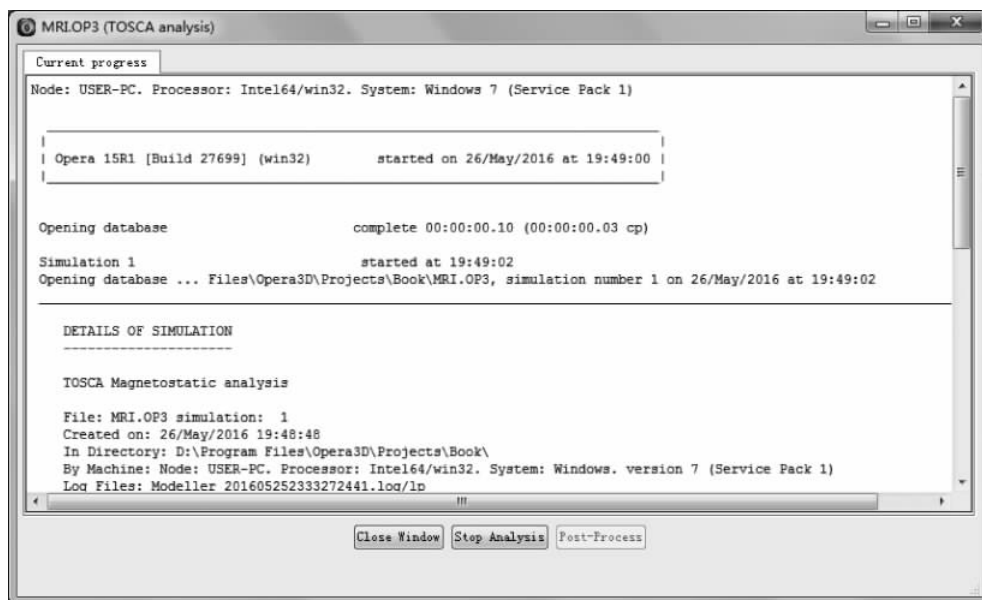


图 3.1.31 解算报告窗口

出后处理程序并加载后处理文件(解算数据文件变为后处理文件),同时关闭解算报告窗口。后处理文件也可以通过直接打开目录内的 MRI.op3 文件(代替解算文件,同名),或者在 Manager 中单击打开后处理程序,然后通过在后处理程序中打开后处理文件。后处理文件存有 Opera3D 有限元计算的场值,后处理即根据场值生成最终需要的磁场分布图或者数据文件,或者进行相关参量的进一步计算,如电磁力、磁场能量的计算等。

### 1. 模型显示

后处理文件打开后形成如图 3.1.32 所示的窗口。

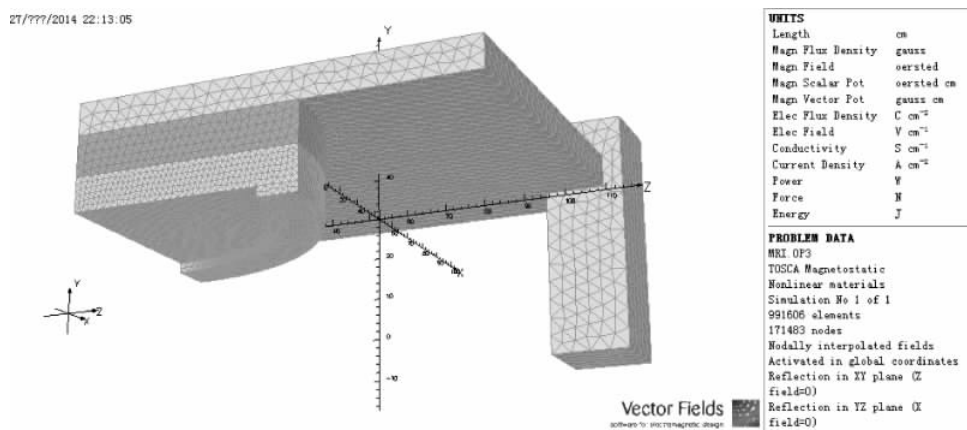



图 3.1.32 后处理程序模型显示窗口

窗口中显示的磁体为建模体网格生成时的 1/8 模型。单击工具栏的显示选择按钮  调整显示形式,弹出的模型显示设置对话框如图 3.1.33 所示。

在 Show model symmetry 下拉列表框中选择 Full 选项,再单击 Select and Refresh 按

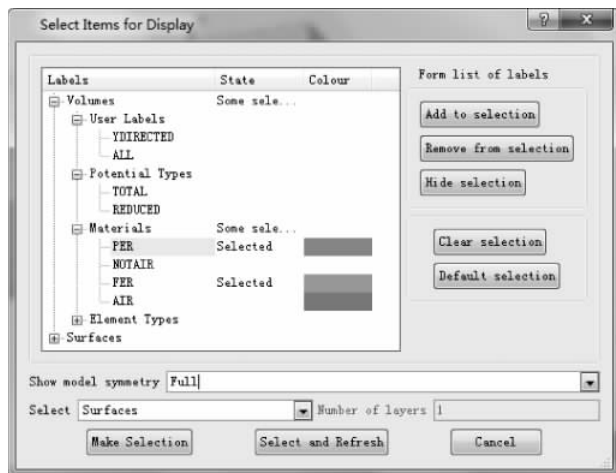


图 3.1.33 模型显示设置对话框

钮,便可以显示磁体全模型,如图 3.1.34 所示。

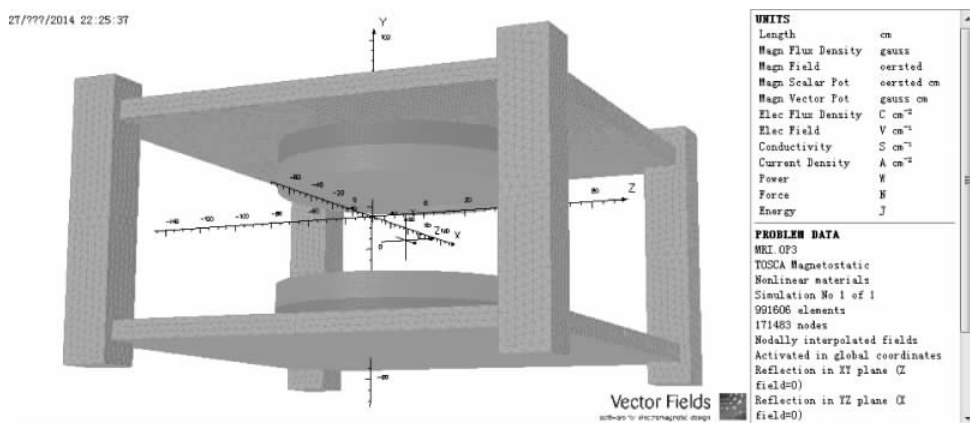



图 3.1.34 全模型显示窗口

在显示设置对话框中,上半部分用于选择哪些部分在主窗口显示,这些可以由 name 名称、label 标识名、material 材料类型分类。例如展开 volume 中的 material,单击 per 选项,然后单击右侧 Hide selection 按钮,再单击 Select and Refresh 按钮,主窗口中的磁体中材料名称为 per 的永磁体部分就被隐藏了,如图 3.1.35 所示。类似地,可以在后处理中进行显示和隐藏各个部分,以便更好地观察图像或选取模型的部分。窗口最下端 Select 选项可以选择 Surfaces,即磁体几何模型的表现,选择 Mesh,即所建的有限元体网格,读者可以通过观察体网格观察网格质量。

## 2. 自定义区域场值计算和显示

Opera3D 后处理可以允许读者在特定的区域,如空间中的一点、一线段(直线或曲线)、一面(圆面或矩形面等平面、球面)上获取场值并用色温显示。场值可以是磁场强度  $H$ 、磁感应强度  $B$  或者关于  $H$  或  $B$  的某种函数。

(1) 计算空间某一点的场值。方法是单击工具栏的 Field on a Point 按钮 ,弹出如

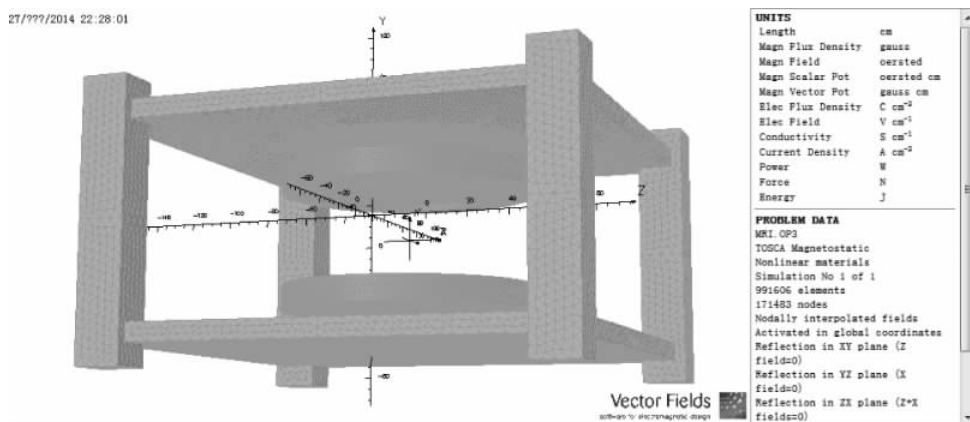


图 3.1.35 隐藏永磁体后的模型

图 3.1.36 所示点场值计算设置对话框,输入关心的场点三维坐标值,选择所求场值类型 Field component 选项为 By,单击 OK 按钮或者应用 Apply 按钮即弹出如图 3.1.37 所示显示场值结果对话框,同时在主窗口中该点还会被高亮显示。

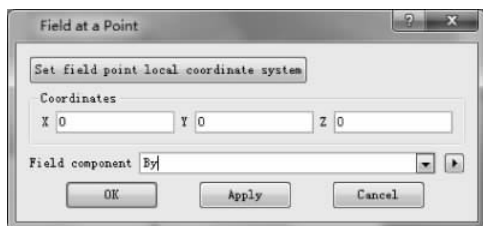


图 3.1.36 点场值计算设置对话框

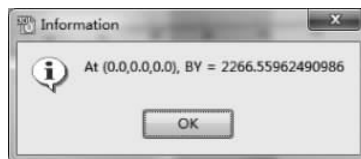



图 3.1.37 计算结果显示对话框

(2) 计算空间某一线段上的场值。方法是单击工具栏的 Field on a Straight Line 按钮 ,弹出如图 3.1.38 所示的线上场值计算设置对话框。

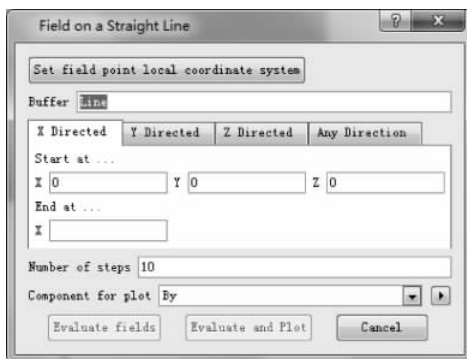


图 3.1.38 线上场值计算设置对话框

在对话框中输入线段的定义参量。Buffer 选项用于存储计算场值的数据寄存器,可任意为其命名;如果定义的线段与  $x$  轴平行,则在默认标签页 X Directed 中输入起始点 Start at...的三维坐标值、结束点 End at...的  $x$  坐标值,如果是与其他方向平行的线段,则选择相

应的选项卡,或是任意方向的 Any Direction 进行设置;设置线段上计算点的个数 Number of steps,个数越多,场值曲线越平滑,但计算耗时更长;选择所求场值类型 Component for plot 为 By,单击 OK 按钮或者应用 Apply 按钮便生成一个二维图表,横轴表示场点位置,其直角坐标值在下面显示,纵轴为所求点的场值,如图 3.1.39 所示。

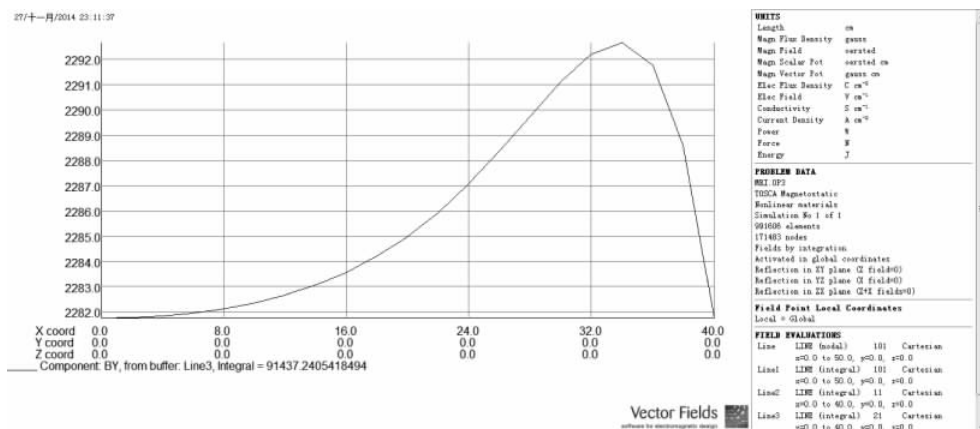


图 3.1.39 线上场值图表

该线段同时也在主窗口中被高亮显示出来,关闭或者还原图 3.1.39,则显示的主窗口如图 3.1.40 所示。

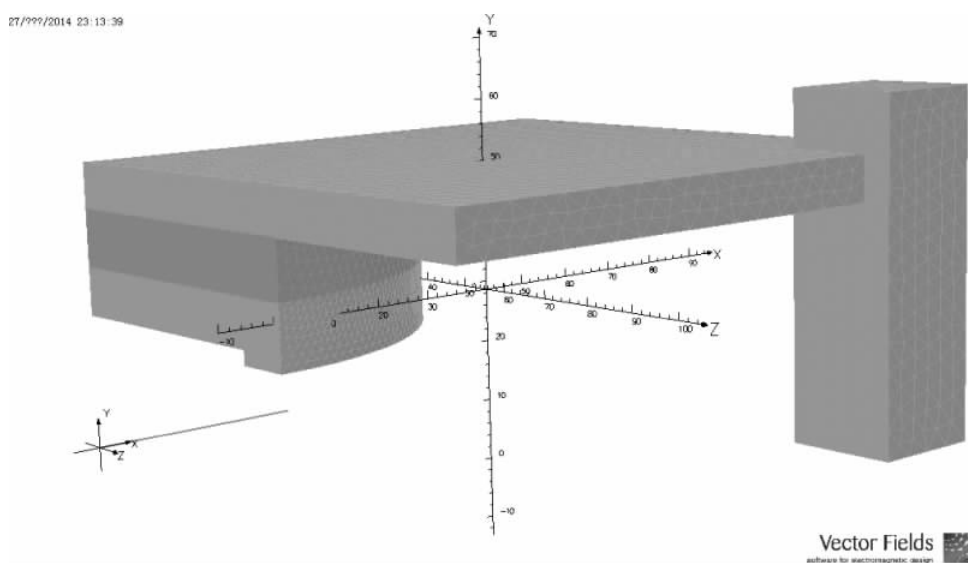



图 3.1.40 模型及线上场值显示窗口

(3) 计算某一球面上场值分布。单击工具栏的 Field on a Spherical Surface 按钮 ,弹出如图 3.1.41 所示的球面场值计算设置对话框。

在对话框中输入场值寄存器 Buffer 的名称,选择计算完整球面 Complete sphere 选项,输入球面半径 Radius,输入球面上所需计算点的个数 Number of points,该个数需在两维上进行定义,即球坐标中的经度方向的个数 on polar lines 和纬度方向的个数 on azimuthal

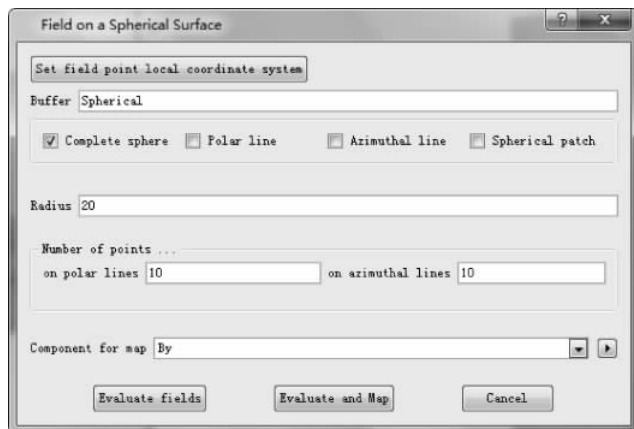


图 3.1.41 球面场值计算设置对话框

lines。选择所求场值类型 Component for map 为 By 或 Bmod,单击 OK 按钮即在主窗口中显示出 By 在该球面上的分布,如图 3.1.42 所示。

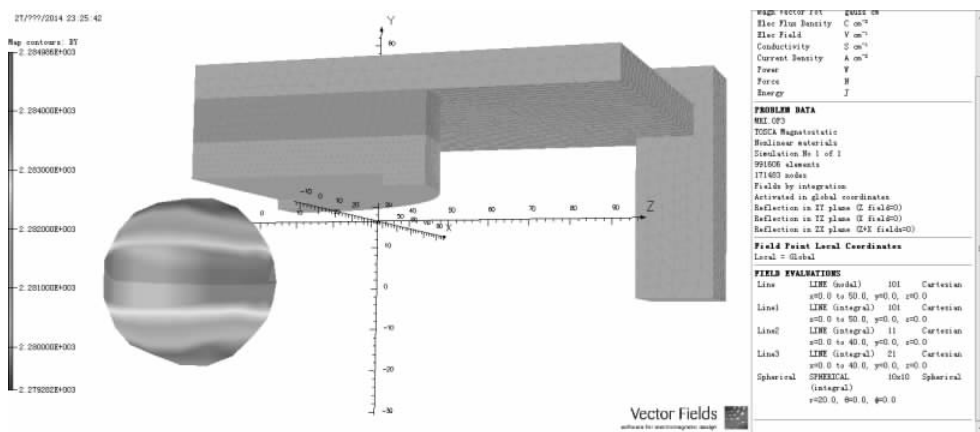



图 3.1.42 模型及球面场值 By 分布

### 3. 几何模型表面的场值计算和显示

Opera3D 可以直接显示所建几何模型表面的场值分布云图。单击工具栏的 3D Display 按钮 ,弹出如图 3.1.43 所示的对话框。

选择第一行的 Component contours,即模型表面的颜色按场值显示。Field component 下拉列表用于选择需要得到的场值,如 By; Component limits 框定义显示的场值的范围,如果有区域的场值超过该范围,那么该区域将显示其所靠近的范围边界对应的颜色,默认显示范围为所求场值的最大值和最小值之间。

往下是矢量显示选项。如果选择 Vectors,则在模型表面还将显示场值的矢量,用箭头表示,箭头的长度表示场值的大小,箭头的方向表示场值的方向。Vector components 选项区用于设置矢量箭头,如果勾选 Display vectors by size,Scaling factor 则表示一个矢量箭头的缩放系数,该系数与场值的乘积对应箭头的长度,该长度与几何模型同一单位。矢量的箭

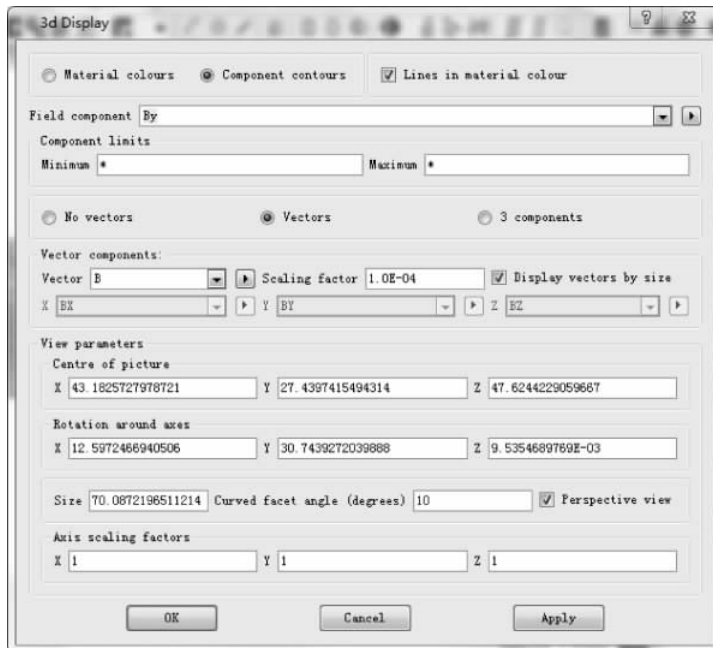



图 3.1.43 3D 场值显示设置对话框

头大小应易于观察,因此如果要显示的场值是几千高斯的磁场,需要将该系数设为  $1.0E-03$  量级。如果不知道会产生大概多大量级的场值,可以先不显示矢量,即先勾选 No vectors 项,等显示场值云图后再次打开本对话框时,根据显示的场值设置矢量显示。

对话框下部用于设置模型的观察视角 View parameters 和坐标轴的缩放比例 Axis scaling factors,读者可以自行尝试。设置好对话框内的参数后,单击 OK 按钮。如果在模型显示设置中(显示选择按钮 )将模型设为非完整的对称模型(如本例的 1/8 模型),那么就会在其对称面上显示所需场值分布,如图 3.1.44 所示。

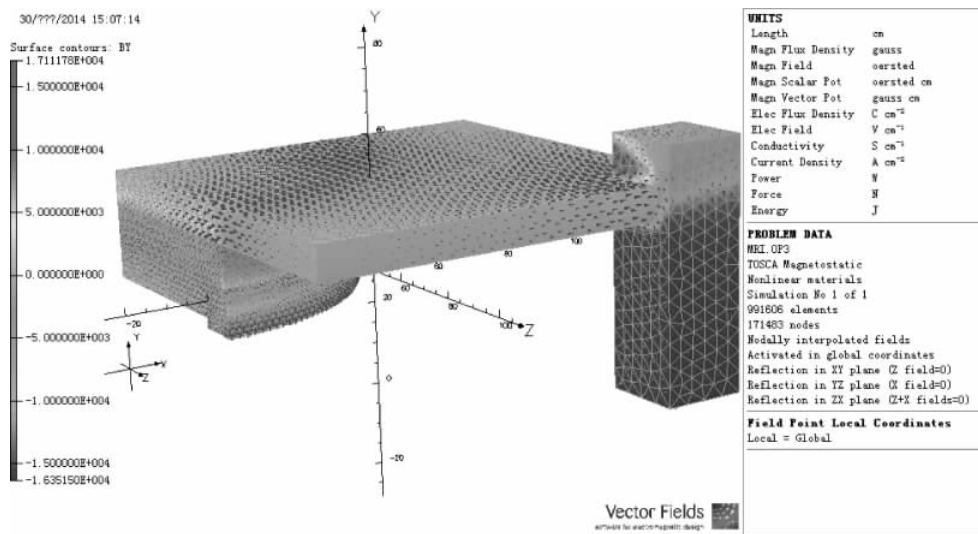


图 3.1.44 模型 3D 场值显示

以上给出了一个永磁 MRI 磁体进行几何建模、材料参数输入、边界条件设置、有限元网格划分,解算和后处理的完整过程。通过此例,希望读者可以大致的掌握 Opera3D 有限元建模和分析的基本步骤。

## 3.2 三维静磁场分析范例——超导线圈+铁磁 MRI

知识要点:

- 导入其他 CAD 制图软件生成的几何文件;
- 更准确地求解局部区域的磁场;
- 后处理中导体的电磁力计算;
- Legendre 级数。

模型介绍:

本范例为另一简化的核磁成像磁体 (Magnetic Resonance Image, MRI) 模型,如图 3.2.1 所示。该磁体不含永磁体,仅含有铁磁体(包括铁扼支架和一对匀场磁极),以及一对超导线圈。一次场源即为通电超导线圈。在此例中,将不通过 Opera3D Modeller 自带的几何建模工具生成各部分的铁磁体,而是通过导入由其他软件(如 SolidWorks)生成的几何模型文件(如.igs 文件)生成铁磁体。

### 3.2.1 几何模型建立

通过 Opera Manager 打开 Modeller 之后(参见 2.2 节),首先建立铁磁体。本例中,铁磁体的几何建模先在其他 CAD 软件中(如 SolidWorks)完成,并生成 Opera3D 可识别的文件格式,如常用的 igs 文件等。单击菜单命令 Creat→Insert from File→Other Files 选项,在弹出的对话框中选择模型文件 MRI2.igs,单击 OK 按钮,在 Modeller 主窗口显示出几何模型,如图 3.2.1 所示。

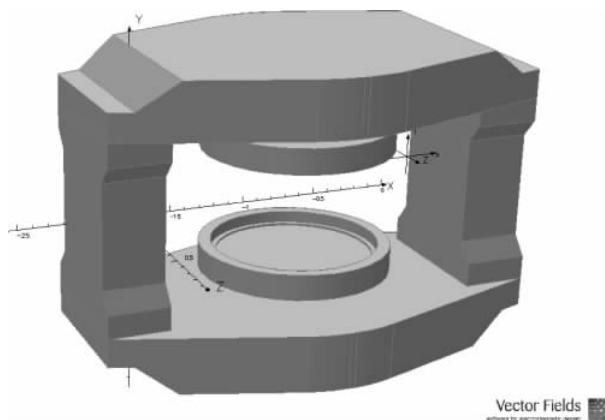




图 3.2.1 导入的核磁成像磁体几何模型

需要注意的是,igs 文件名及放置的目录名均应全为英文或数字组成,否则会报错无法读入。此外,导入的几何模型一般仅包含尺寸数据而不包含几何单位信息,例如若在 SolidWorks 中用 mm 为单位创建三维图形,图形的尺度在 m 的量级,那么所生成的 igs 文

件读入 Opera3D 后,形成的模型的几何尺度的数值量级就是上千的情况。由于 Modeller 默认显示在主窗口中的 3 坐标轴数值均在 10 左右,导入几何模型尺寸为上千时会导致主窗口模型的显示过大,此时可以通过鼠标中间的滚轮将尺寸进行显示缩放。如果要将模型的几何数值量级减小到读者需要的几百(CGS 单位制)或几(SI 单位制),可以将导入后的模型实体进行缩放(是数值缩放,实体缩小而坐标轴不变)。首先确认工具栏的 Pick Bodies 按钮  被选中,这样可以在主窗口选择实体,然后双击选中所导入的铁磁体模型实体,然后单击鼠标右键快捷菜单中的变形命令 Transform,弹出如图 3.2.2 所示的实体变形设置对话框。

在对话框的左侧选择缩放 Scale 选项,右侧的 U、V、W 分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的 Scale factors,即缩放比例。如果是等比例缩放,那么输入相同的参数,对于从 SI 单位(如 SolidWorks 中)变为 CGS 单位,即放大 100 倍,3 个缩放比例需均输入 100,单击 OK 按钮,主窗口中的几何实体的三维尺度数值即被放大 100 倍。缩小后,在主窗口中有可能看看不出或显示很大的几何实体,此时在主窗口中滚动鼠标滚轮,或单击正等轴测图显示按钮 ,即可将几何实体的显示缩小到合适尺寸。注意这时只是主窗口的显示放大,实体显示放大过程中坐标轴标度也在放大。

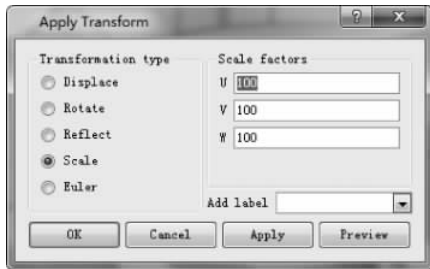



图 3.2.2 实体变形设置对话框

此外,如果导入的几何体的中心并不在 Opera3D 原点上,那么利用模型对称性建模时就会出现问題。为此,需要先将几何模型的中心建立在原点上。一种方式是在几何建模软件中设置,例如对 SolidWorks,可以打开装配体的配合功能,将模型的一些边的中点与前视、右视、正视基准面进行重合配合,使模型的中心与原点重合,然后将模型再另存为 igs 格式,再次通过 Opera3D 导入即可;另一方式是确定模型中心点的坐标,然后在 Opera3D 中直接移动模型至原点处,方法是选定实体→右键→Transform→Displace 选项,输入坐标参数即可。

铁磁体的几何模型导入之后,建立超导线圈。在 Opera3D 中,超导线圈被看作纯导体,导体截面上的电流密度均匀分布,Opera3D 由积分法直接计算导体产生的磁场强度,参见第 1.2 节。单击工具栏的 Solenoid 按钮 ,弹出如图 3.2.3 所示的螺管线圈创建对话框。

首先是 Solenoid Parameters 选项卡。Opera3D 中的螺管线圈是通过其矩形截面上矩形的 4 点坐标建立的。XP1, YP1 是其中一个点 P1 的  $r$  向和  $z$  向坐标,XP2, YP2, XP3, YP3, XP4, YP4 以此类推,4 个点 P1, P2, P3, P4 需按顺时针或逆时针排列。螺管线圈截面可以是矩形,也可以是任意四边形。此外, CU1 定义截面上第一个点处的曲率,即截面可以不是严格四边形,而是带有圆角的四边形,默认为不带圆角,此时 CU 值均为 0。选中对话框的 Further Options 选项卡,如图 3.2.4 所示,定义线圈的激励源等参数。

Opera3D 中线圈的激励源有两种,一种是 Biot-Savart 电流源 Biot-Savart current source,此种情况只需定义线圈截面的电流密度 Current density 即可;另一种是电路单元 Circuit element,此种情况是使线圈成为自定义电路中的一个部件,线圈电流通过电路定义。但是对于 TOSCA 静磁场模块,仅可用 Biot-Savart current source,而 Circuit element 可用于 ELEKTRA 暂态场模块。其他选项区如 Local Coordinate Systems 用于定义线圈的

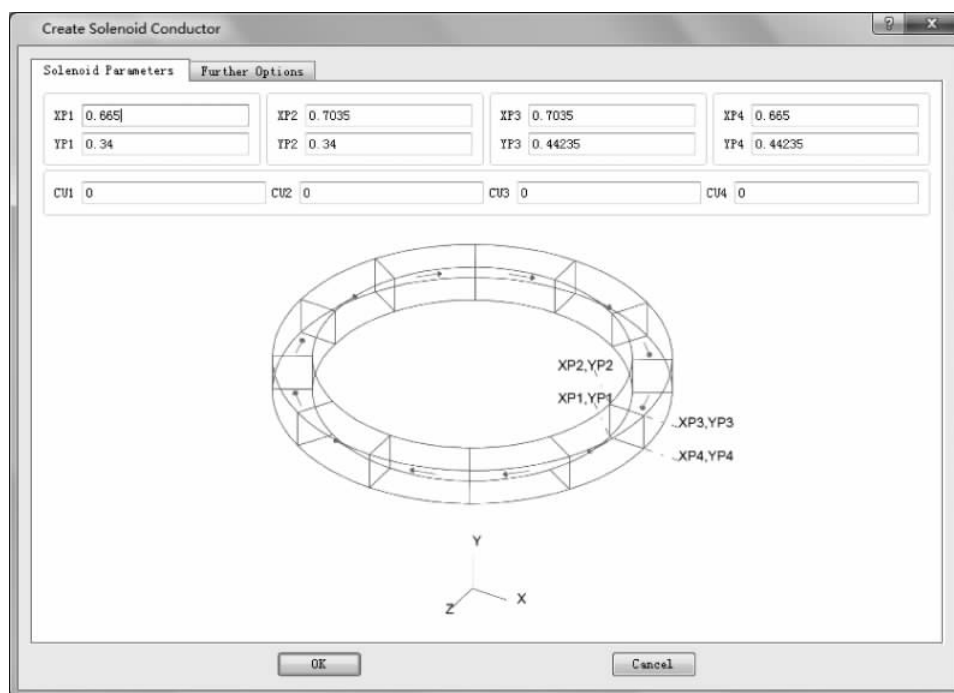


图 3.2.3 螺管线圈创建对话框

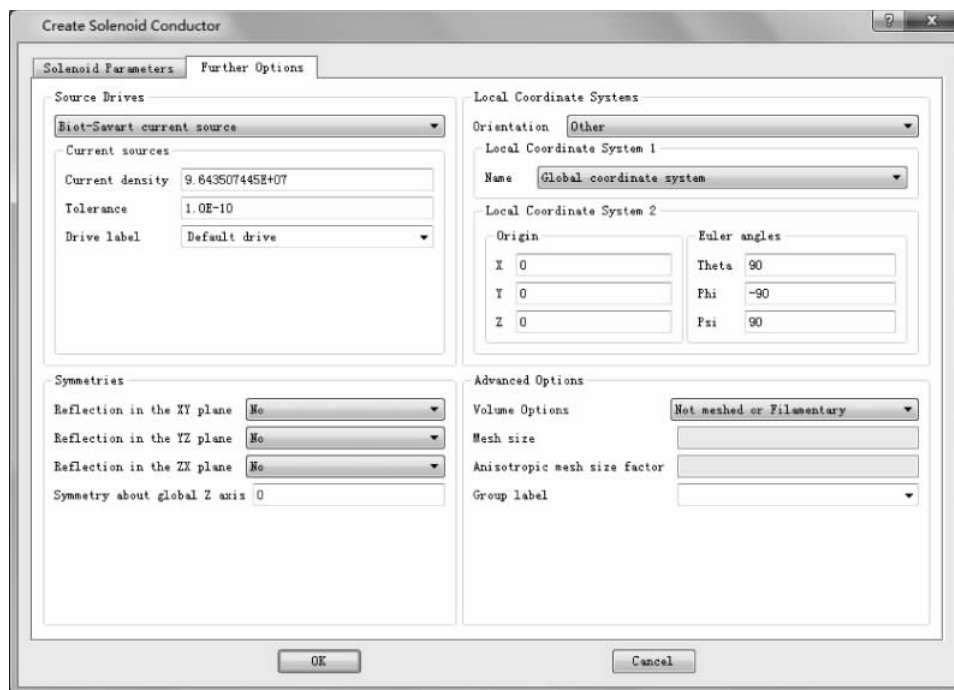


图 3.2.4 定义线圈的激励源对话框

位置和角度；Symmetries 用于定义对称的线圈，例如关于  $xz$  平面对称线圈，或者关于  $z$  轴对称的线圈，这样可以方便建立新的对称线圈；Advanced Options 用于定义线圈的有限元网格划分参数，当线圈不仅用于产生磁场时，例如失超 QUENCH 模块中需计算线圈温度场时，就需对线圈进行有限元网格划分。设置完后单击 OK 按钮，主窗口如图 3.2.5 所示。

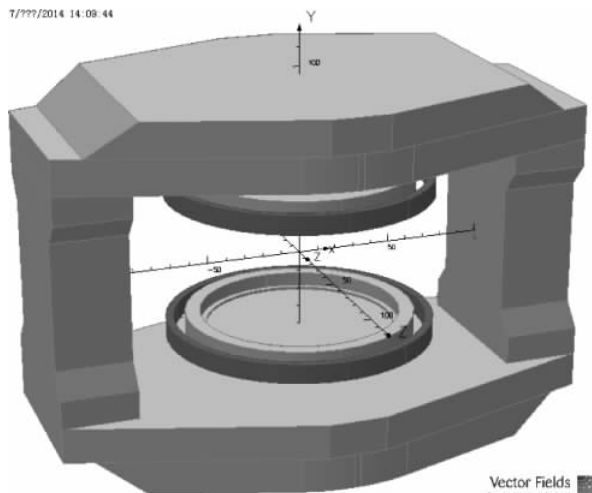




图 3.2.5 磁体模型及创建的螺管线圈

### 3.2.2 指定实体属性

指定模型中铁磁体实体的属性参数。该模型中仅铁磁体是实体，线圈不算实体，这是因为线圈产生的场值直接用积分公式法得到，而非通过有限元法。单击工具栏的实体选择按钮 , 双击选择屏幕上的所有铁磁体，或者单击  按钮选择所有实体（因为实体仅有铁磁体一种材料），使其高亮，再单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Cell Properties 选项，弹出实体属性设置对话框。按图 3.2.6 所示填入数据。

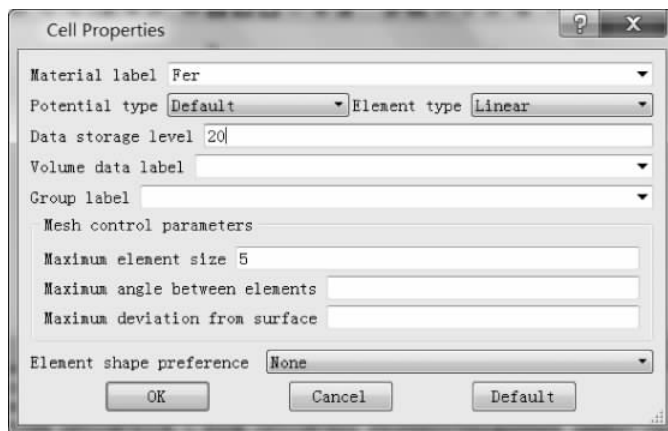


图 3.2.6 实体属性设置对话框

对话框中选项说明如下。

- Material label 标识此几何实体的材料名称。材料的具体属性函数在后面设定。
- Potential type 用于矢势计算类型选择,一般选择 Automatic 让程序自动选择即可。相关设定请参照 1.2 节和《Opera-3d Reference Manual》。
- Data storage level 为材料参数级别,当两个实体相交时,相交部分的参数采用高级别实体的物性参数。
- Volume data label 用于定义永磁的磁化特性。
- Group label 用于给若干实体设定一个统一名称,便于其他操作。对于本例,再次选择实体并单独选择两个圆盘铁磁磁极,设定它们的 Cell Properties,在 Group label 中输入一个名称,如 P1,以便之后的后处理中按名称选取使用。
- Mesh control parameters 用于网格划分参数设定。其中,Maximum element size 用于设置该实体中有限单元的最大尺寸。尺寸的选择很重要,需要反复调节网格划分参数,包括另外两个参数:两单元间最大夹角 Maximum angle between elements 和最大面偏离度 Maximum deviation from surface。这两个参数是用有限单元体,如四面体描述几何模型中曲面时用到的参数,它们决定如何使有限单元拼接后更能反映真实曲面,同时控制曲面上四面体的形状,相关介绍详见《Opera-3d Reference Manual》。对于初学者,这两个参数保持默认即可。选择有限单元形状 Element shape preference,一般来说,选择四面体为该几何实体的有限单元体是最常用的。设置完毕单击 OK 按钮,可以见到主窗口中铁磁实体的颜色变成绿色,如图 3.2.7 所示。因为导入几何模型时,Opera3D 默认为空气,是灰色的,当设置为某种材料后,即显示有别于空气的颜色。

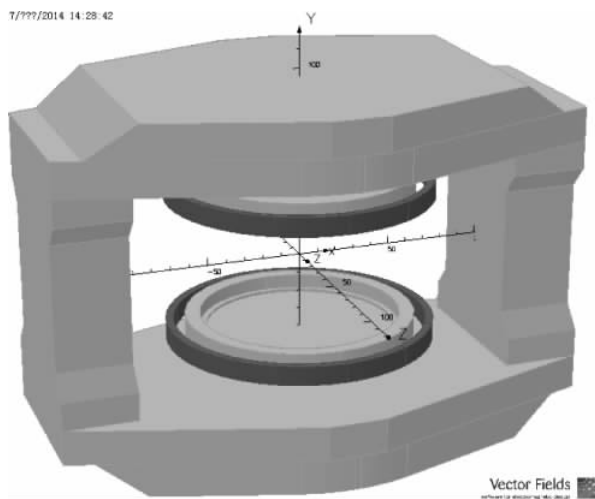


图 3.2.7 设置材料属性后的磁体模型

线圈的参数在建立线圈时已经确定,无须再设置。

### 3.2.3 解算模块设置

本例中仅计算通电线圈和铁磁体产生的静磁场,因此需要指定 TOSCA Magnetic 模块

进行计算,方法是菜单栏命令单击 Model→Analysis Type→TOSCA Magnetic 选项。只有当这一命令指定后,以上这些对话框中的一些内容才会显现。

设置完解算模块后,Model 菜单栏的内容会进行相应的调整以显示可用的菜单内容,便于相关参数的设置。选择 TOSCA Magnetic 模块后,可以单击菜单栏命令 Model→TOSCA Magnetostatics settings 弹出 TOSCA Magnetic 模块设置对话框,进行 TOSCA 模块的相关参数设置。图 3.2.8 左上角区域选择非线性材料特性 Use nonlinear properties,用于计算铁磁材料,计算时会根据材料的 BH 函数进行迭代求解;对话框右侧选取迭代的参数设置,一般选取 Simple update 即可;其他参数一般按照图 3.2.8 输入即可。

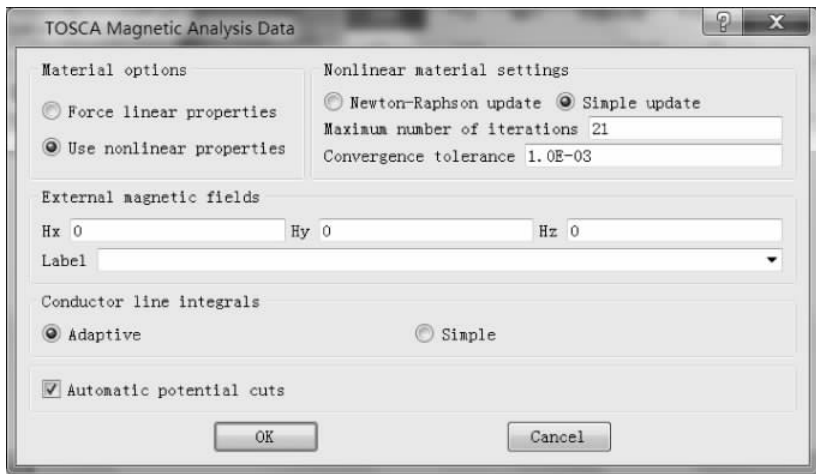


图 3.2.8 TOSCA Magnetic 模块设置对话框

### 3.2.4 设定材料参数

前面对铁磁实体标识了材料名称,下面对材料的具体属性参数进行设置。单击菜单栏命令 Model→Set Material Properties,弹出如图 3.2.9 所示的材料属性设置对话框。在左下角是数值单位的选择,这里单位仅用于显示此对话框中参数,对于模型中几何参数的单位

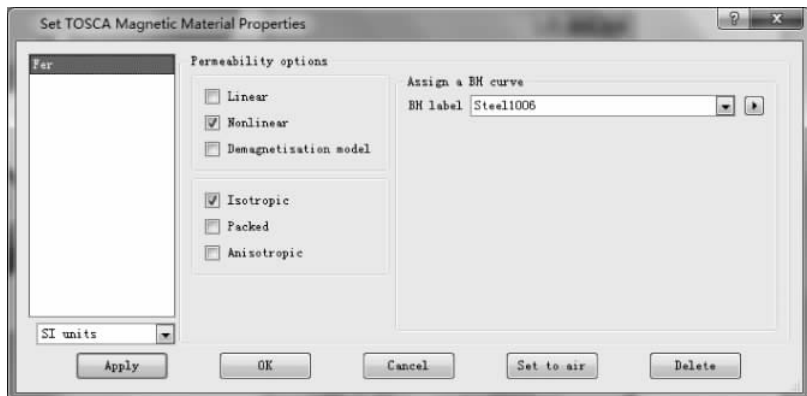




图 3.2.9 材料属性设置对话框

将在后述最后一步建立解算数据时设定。对话框左侧选中材料名称 Fer 可进行参数设置。在右侧看到材料的一些电磁参数：如磁导率选项 Permeability options, BH 曲线函数选择等。这里选择非线性磁导率 Nonlinear, 选择各项同性 Isotropic, 设定 BH 函数名称 Steel1006。

这里设定或选择的是 BH 的函数名称, 而 BH 函数需要先在菜单栏中的 Model→Set BH Curve Properties 选项进行定义; 定义方法请翻阅前一节相关部分, 在此不再赘述。

### 3.2.5 设定边界条件或对称性

设定外材料参数后, 进行有限元网格建模。有限元模型的外围空间一般设为原有几何模型尺寸的几倍大小就足够。单击菜单栏命令 Model→Model Symmetry, 弹出如图 3.2.10 所示的对话框。

Shape of background 用于设定外围空气域的形状。一般来说, 空气域的边界与磁场相切有利于计算结果的准确性, 根据这一原则及读者对磁场分布的定性分析, 可以为空气域选定形状。本例中, 由于线圈和磁极是圆环形, 因此这里可以设置外围空气域形状为圆柱形 Cylinder(也可以设置其他形状, 读者可以自行比较)。在 Cylindrical Scale Factors 选项区中设置背景空气域的尺度, Z 值为  $z$  轴方向上背景空气域尺度与几何模型  $z$  轴方向最大尺度之比, R 值为径向上背景空气域尺度与几何模型  $xy$  平面上最大尺度之比。这里有一个问题,  $z$  轴方向上并非本模型的轴向, 因此还需要将模型翻转, 使模型的轴向与坐标轴的  $z$  向重合。先单击 OK 按钮确定回到主窗口, 然后分别翻转实体和线圈。翻转实体: 单击工具栏中的实体选择按钮 , 再单击  按钮选择所有实体, 鼠标右键快捷菜单中选择 Transform 变形选项, 弹出如图 3.2.11 所示的对话框, 左侧选择 Rotate, 右侧输入旋转轴矢量(1,0,0), 旋转角度  $90^\circ$ , 单击 OK 按钮。

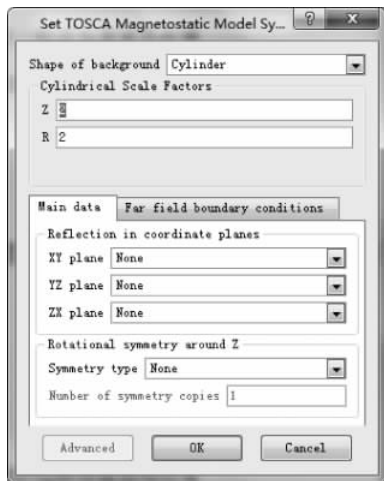


图 3.2.10 模型对称性设置对话框

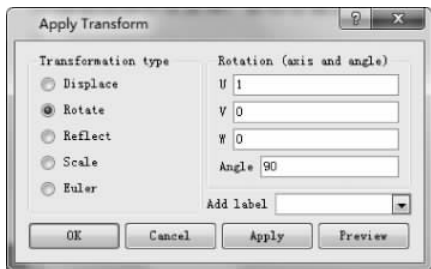




图 3.2.11 实体变形设置对话框

翻转线圈: 单击工具栏的实体选择按钮 , 单击按钮  选择所有线圈, 单击鼠标右键, 在快捷菜单中选择 Transform 变形选项, 弹出窗口与图 3.2.11 一样, 左侧选择 Rotate, 右侧输入旋转轴矢量(1,0,0), 旋转角度  $90^\circ$ , 单击确定 OK 按钮。主窗口中显示的线圈变为

一个,只是因为之前设置的线圈对称性为 $yz$ 平面对称,在此并没有自动转换。为此再双击所选线圈,单击鼠标右键,在快捷菜单中选择 Modify Conductors→Solenoid 选项,弹出的对话框与线圈定义的相同,可在此对线圈进行修改。单击 Symmetries 选项卡,按图 3.2.12 所示设置为 $xy$ 平面对称,单击 OK 按钮,线圈即设定为一对。此例中,由于后处理时需用积分法求解每一个线圈的受力,以上仅为示范,在此需要将对称性设为 No,然后通过将线圈复制得到另一侧的对称线圈。

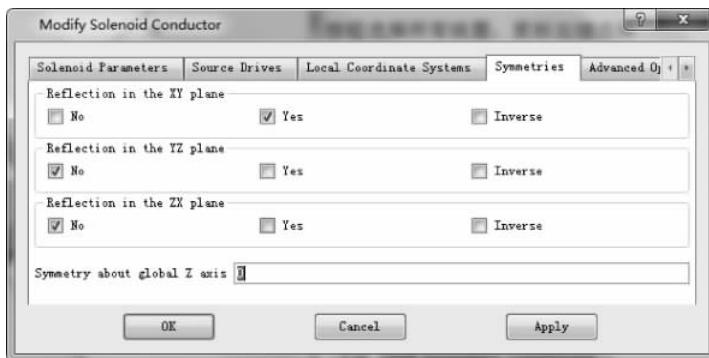


图 3.2.12 线圈修改对话框

此时,主窗口即显示出原几何模型的轴与 $z$ 轴重合,如图 3.2.13 所示。

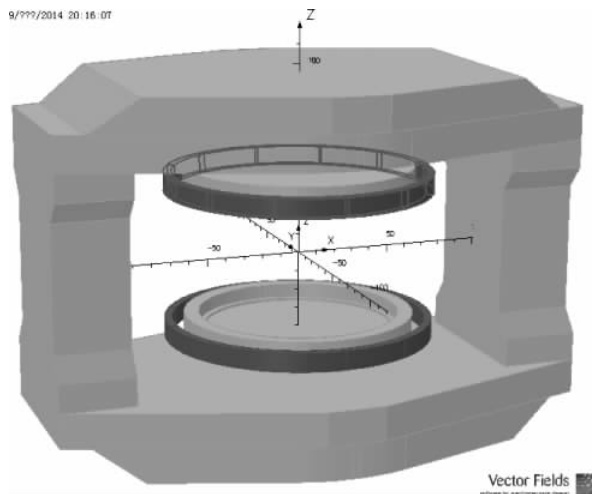


图 3.2.13 模型轴与 $z$ 轴重合

单击菜单栏命令 Model→Model Symmetry,继续设置整个模型的对称性。一般来说,无须对空气域的外围边界进行特别设定(Far field boundary conditions),Opera3D 会自行设定。需要读者自己设定的是几何模型的磁场对称性。当磁场关于某一坐标轴平面( $xy$ 平面、 $yz$ 平面或 $zx$ 平面)对称时,如果磁场垂直于该平面,那么满足法向对称性 Normal magnetic,如果磁场平行与该平面,那么满足切向对称性 Tangential magnetic。对于本例,磁场关于 3 个坐标轴平面都对称,即可以仅计算 1/8 模型。根据图 3.2.14 所示选择相应的对称边界条件。

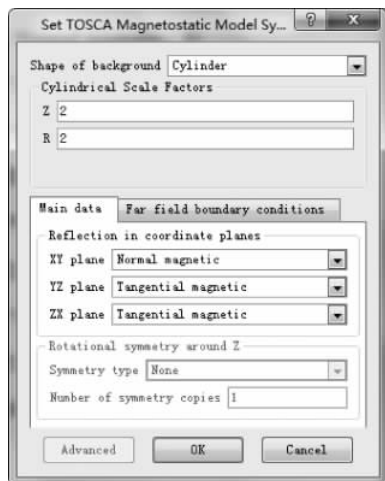


图 3.2.14 模型对称性设置对话框

### 3.2.6 建立有限元网格,生成解算数据进行解算

在生成有限元网格之前,需要先将所有模型内的实体包括背景空气域生成一个体,单击菜单栏命令 Model→Create Model Body,模型如图 3.2.15 所示。此时,除了网格划分,模型中的各实体都不能再修改。可以看到,有限元的实体及背景空气域变为 1/8 模型,而线圈由于是非有限元建立的,仍然显示全部模型。

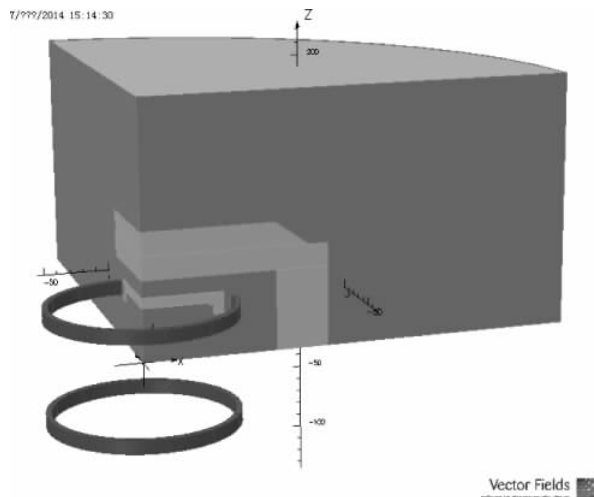


图 3.2.15 模型体生成

然后,先生成面网格,单击菜单栏命令 Model→Generate Surface Mesh,弹出如图 3.2.16 所示的对话框,窗口中的内容与实体中网格划分参数的含义相同,只是这里是全局设置。如果某实体没有设置其网格参数,如最大网格尺寸,那么其网格划分将自动采用此处的全局参数。此外,背景空气域采用此全局参数划分网格。

在生成面网格之后,Opera3D 根据已划分的面网格进行体网格划分。单击菜单栏命令

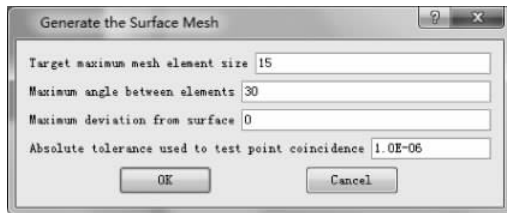


图 3.2.16 全局面面网格设置对话框

Model→Generate Volume Mesh,弹出如图 3.2.17 所示对话框。

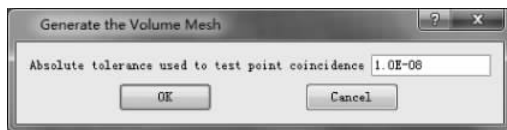


图 3.2.17 体网格设置对话框

对话框内只有一个参数,代表网格生成过程中空间两点的尺寸辨别误差,此参数越小,代表体网格划分越能辨识小体积的几何体,一般可取  $1.0E-08$ 。面网格和体网格的建立有时不成功,此时需要多次调整网格划分参数。每次改变网格参数后,需要重新执行生成面网格、体网格等步骤,然后可以在视图上观察网格密度或形状的变化情况。体网格生成后模型如图 3.2.18 所示。

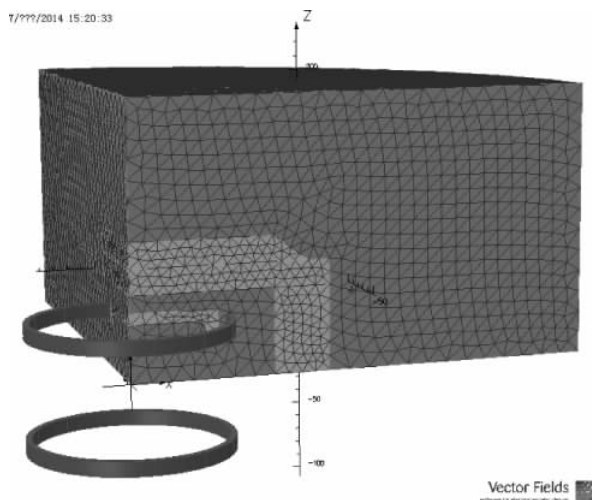


图 3.2.18 体网格生成后模型

最后,生成解算数据用于求解,单击菜单栏命令 Model→Create Analysis Database,弹出如图 3.2.19 所示的对话框。

解算数据的文件后缀名为 .op3,需要在 Database 中指定,在生成解算数据文件的同时,也会生成同名称的模型数据文件,后缀名为 .opc;对话框中 Units 用于选择标准单位 SI 制或者 CGS 制等,这里选择的单位即代表了模型中几何坐标的单位,关于 CGS 制单位可参照《Opera-3d Reference Manual》或相关资料;体单元类型 Element type 及面单元类型

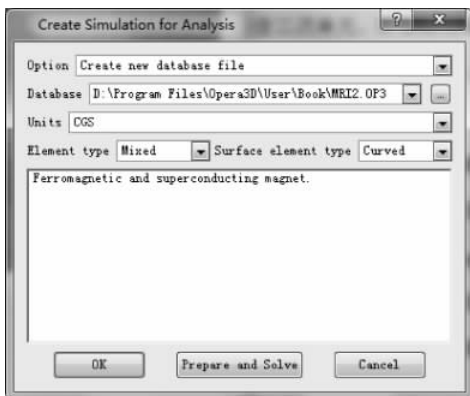



图 3.2.19 解算数据生成对话框

Surface element type 一般选择 Linear 即可,其他 mixed 或者 curved 选项使单元类型包含二次单元,即有限元单元内的形函数是非线性或是二次曲线形式的,这类单元计算精度更高些但是计算更加耗时;对话框中的下面窗框用于输入相关注释。

单击 Prepare and Solve 按钮,Opera3D 会生成解算文件,然后自动调用解算程序对其进行解算,解算完成后生成后处理文件,覆盖原解算文件,即与解算文件同名;如果单击 OK 按钮,那么只生成解算数据文件,可供今后需要时再进行解算(在 Opera Manager 中,右键单击该解算数据文件,在弹出的快捷菜单中选择 Solve 解算)。模型数据文件.opc 生成后,今后便可以直接打开,进行如上的几何模型建立、解算模块设置、网格划分生成等操作,调整或改进模型。

单击 Prepare and Solve 按钮,Opera3D 会弹出一个解算报告窗口。窗口内动态显示解算时间、迭代步骤和计算误差等解算信息供读者参考。这些解算报告会保存在.res 文件中。解算报告窗口可以在 Opera Manager 里设置是否显示。

### 3.2.7 后处理

在解算完成后,解算报告窗口会停止更新内容,单击窗口底部 Post-Process 按钮,Opera3D 调出后处理程序并加载后处理文件(解算数据文件变为后处理文件),同时关闭解算报告窗口。后处理文件也可以通过直接双击该项目的.op3 文件打开,或者在 Manager 中单击打开后处理程序,然后通过在后处理程序中打开后处理文件。上一案例中,已经介绍了如何在后处理窗口中显示点、线(直线或曲线)、面(平面或曲面)上的场值。求某一球面上场值分布。单击工具栏的按钮,弹出如图 3.2.20 所示窗口。

默认 Buffer name,选择完整球面 Complete sphere,输入球面半径,输入球面上所需计算点的个数,该个数需在两维上进行定义,即球坐标中的 theta 和 phi 方向。选择所求场值 Component for map 为磁场的模 Bmod,单击 OK 按钮即在主窗口中显示出球面上 Bmod 的分布情况,如图 3.2.21 所示。

为了更准确地求出中心区域的磁场强度,Opera3D 提供积分法计算场值。在空间中某点的值,Opera3D 默认通过已解得的该点处的有限单元的场值进行近似。此种方法精度较低,且只能计算有限单元覆盖区域,对于没有有限单元的区域则无法求解。Opera3D 还可

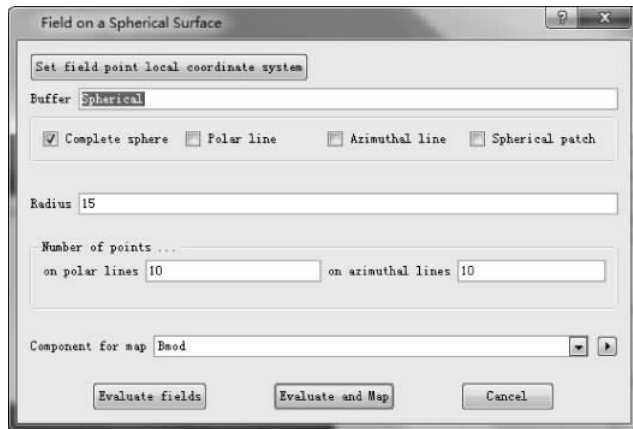


图 3.2.20 球面场值计算设置对话框

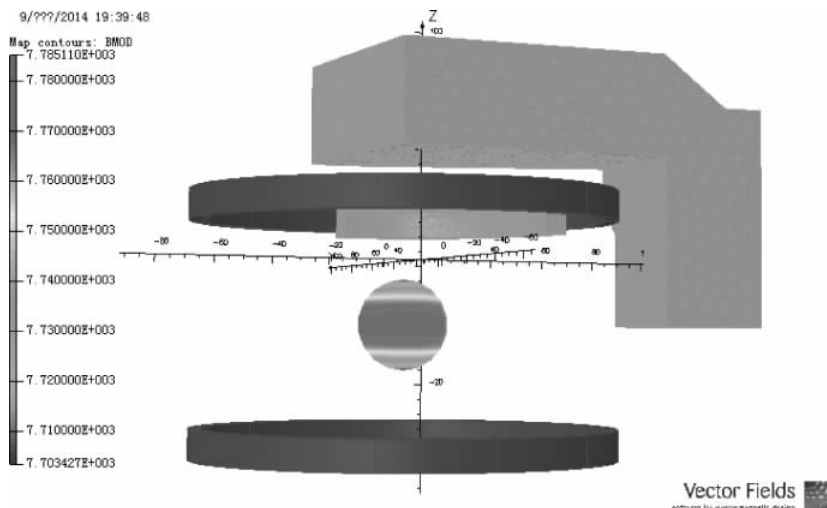


图 3.2.21 球面场值 Bmod 分布

以对铁磁物质在空间中产生的磁场用积分法求解,此时 Opera3D 对铁磁物质所有已求有限单元对空间某点场值进行积分求得。这种方法计算准确度高,但是计算速度慢,可以求解有限单元没有覆盖的区域。单击菜单栏命令 Options→Field Calculation Method,弹出如图 3.2.22 所示的对话框。

对话框中,将 Fileds calculated by 选项改为 integration,单击 OK 按钮,再进行如上的球面场值计算步骤,会得到与先前略有不同的场值分布,如图 3.2.23 所示。从图中左侧的颜色标尺可以看到最大值及最小值与前者计算的结果相差 400 多高斯。对于计算诸如核磁共振磁体均匀度的高精度计算来讲,不同场值计算方法带来计算结果的差异一般还是很明显的。

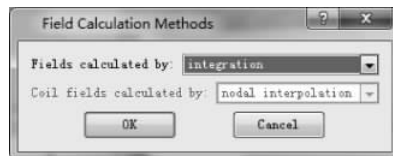


图 3.2.22 场值计算方法设置对话框

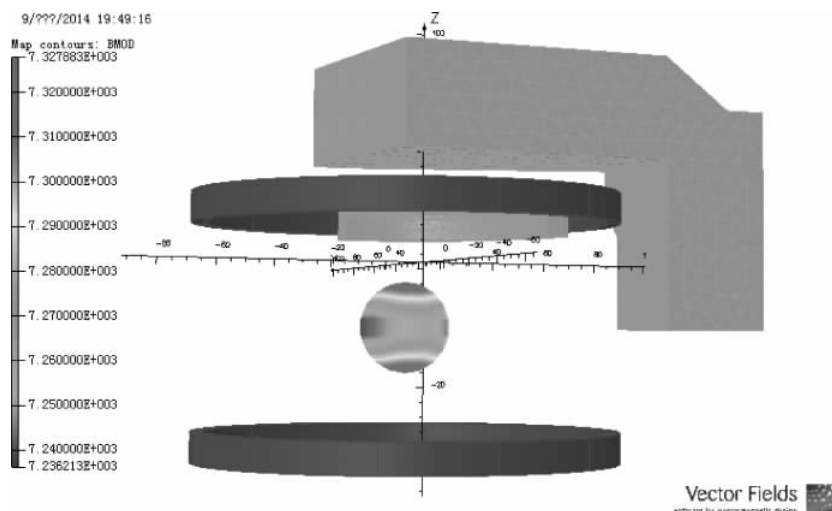




图 3.2.23 球面场值 Bmod 分布

### 1. 电磁力计算

下面介绍通过 Opera3D 后处理得到超导线圈的受力及铁磁体的受力。对于线圈,其电磁力只受洛伦兹力,Opera3D 提供一个直接计算线圈受洛伦兹力及相应力矩的命令。首先在工具栏中确认选中 Toggle Conductor Picking 按钮 , 这样才可以在主窗口中选择线圈; 在主窗口中双击要计算受力的线圈,线圈被高亮,再单击工具栏的 Integrals over Conductor 按钮 , 弹出如图 3.2.24 所示的对话框。

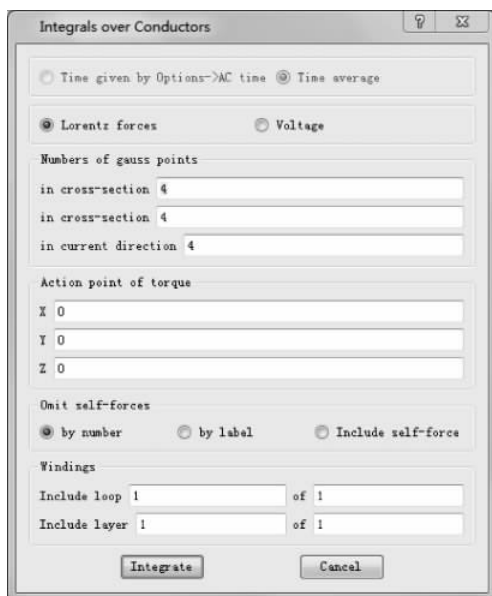


图 3.2.24 线圈积分设置对话框

选择 Lorentz forces, 在 Number of gauss points 中输入线圈径向上 in cross-section、轴向上 in cross-section、周向上 in current direction gauss 插值计算点个数, 个数越多, 计算速度越慢, 但计算也越准确; Action point of torque 用于确定力矩作用点的坐标; Windings 选项中还可以定义线圈一部分的受力, 通过 loop 定义径向上的部分, 以及 layer 定义轴向上的部分确定线圈的一部分。单击 Integrate 按钮, 在弹出的对话框中即显示线圈在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上受洛伦兹力的分量, 以及力矩, 如图 3.2.25 所示。注意此时上述的场值计算方法还是积分法 Integration method, 因此需要先用积分法得到场值然后再进行洛伦兹力计算, 读者可以自行尝试先选择节点插值法 Nodal interpolation, 然后再计算线圈洛伦兹力。

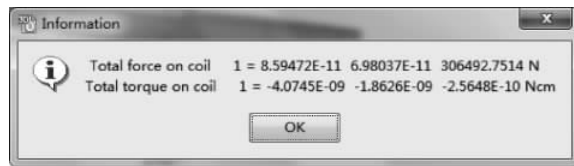



图 3.2.25 计算结果显示对话框

对于铁磁部分的受力, Opera3D 采用 Maxwell 应力表面张量法计算。Opera3D 需要读者选中一个表面, 然后通过对表面的 Maxwell 应力进行面积分得到该物体的电磁力。首先选择要计算电磁力的铁磁表面, 单击工具栏的选择按钮 , 弹出如图 3.2.26 所示对话框。

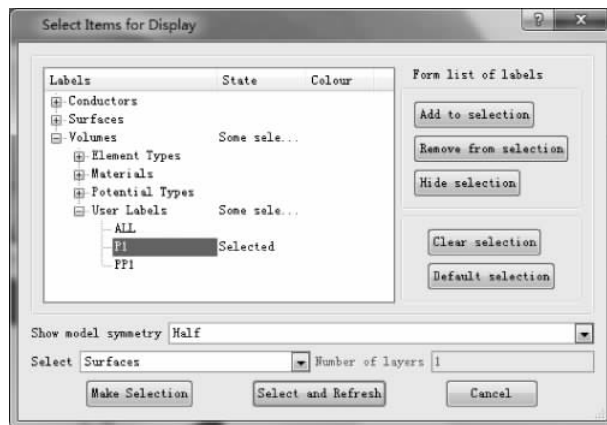



图 3.2.26 模型显示选择设置对话框

首先单击右侧 Clear selection 取消已有的所有选中的表面, 然后按照图 3.2.26 所示选中树 Volumes→User Labels→P1 (在 Modeller 中设定过磁极的 Cell Properties, Group Label 项为 P1), 即选中圆盘磁极, 单击右侧的 Add to selection 按钮, 在下方 Show model symmetry 下拉列表中选择 Half, 即显示整个模型的 1/2。注意对于张量法, 它只对选中的表面进行积分, 如果选中的是 1/8 模型, 那么对称面也会算入张量法的积分中。因此, 选中 1/2 模型, 即可保证只计算该对磁极中的完整一个的表面。最后单击下部 Select and Refresh 按钮, 此时主窗口中只出现读者刚刚选择显示的实体, 即铁磁圆盘磁极。然后单击工具栏的 Maxwell Stress on Selected Surfaces 按钮 , 弹出如图 3.2.27 所示的对话框。

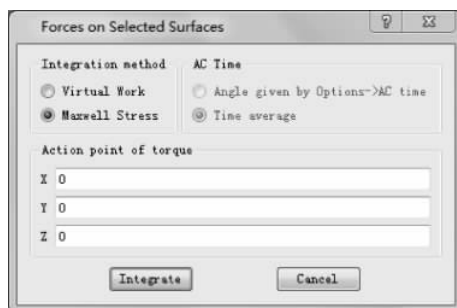



图 3.2.27 表面电磁力计算设置对话框

输入力矩计算的原点,单击 Integrate 按钮,Opera3D 便开始计算铁磁体的电磁力。对于前述积分法,此过程会需要较长时间(计算过程中可以通过单击工具栏的 Cancel this operation 按钮  取消计算),此处一般也可以选择节点插值算法。计算完后会弹出如图 3.2.28 所示的对话框,显示电磁力及力矩在直角坐标系中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量。

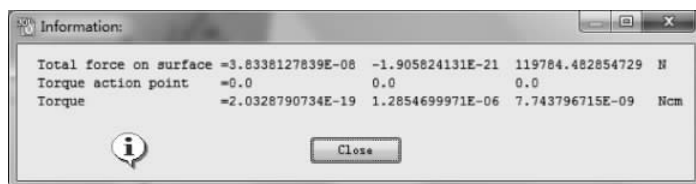


图 3.2.28 计算结果显示对话框

## 2. Legendre 级数

对于核磁成像磁体,往往需要对其均匀区内磁场的 Legendre 级数中各阶分量进行分析。Opera3D 提供这一命令。单击菜单栏命令 Fields  $\rightarrow$  Fit Legendre Polynomials to values,弹出如图 3.2.29 所示的对话框。

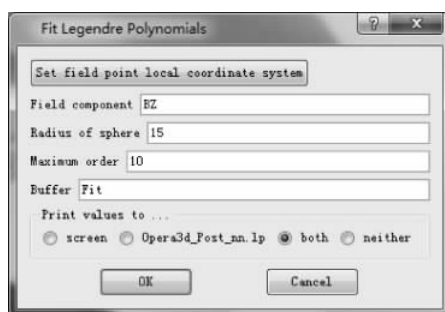


图 3.2.29 Legendre 级数计算设置对话框

在对话框中输入需要计算的磁场分量 Field component,均匀区半径 Radius of sphere,最大计算阶数 Maximum order,输出 Print values to 选择文件或屏显,然后单击 OK 按钮,在屏幕上弹出窗口显示计算结果如图 3.2.30 所示,同时在工程目录下的\opera\_logs 目录中相应的日志文件也将记录结果,用记事本打开即可。

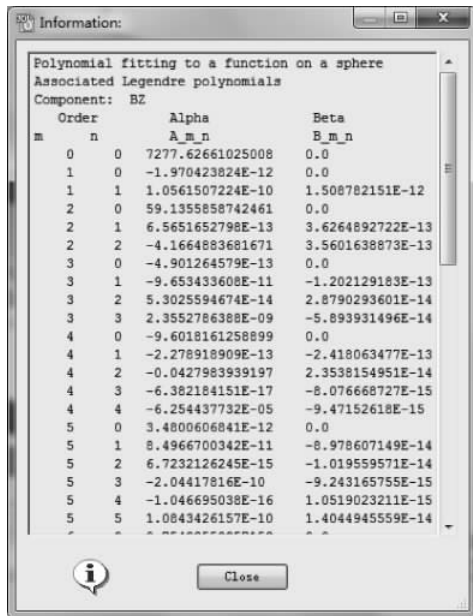


图 3.2.30 计算结果显示窗口

### 3.3 Post-Processor: 单纯线圈产生的磁场

#### 知识要点:


- 无须有限元建模, 而用 Post-Processor 直接计算通电线圈产生的磁场;
- 通过 Table 命令输出计算结果。

#### 模型介绍:

本范例为一纯超导线圈组成的磁体模型。截面图如图 3.3.1 所示, 该磁体包括 1 个长的螺管线圈、2 个短的螺管线圈和 1 个反向通电的长螺管线圈。4 个通电线圈为串联关系, 即通过同一大小的电流, 但是线圈的电流密度不同。

#### 3.3.1 几何模型建立

对于仅由通电线圈组成的电磁模型, Opera3D 可以直接利用后处理程序 Post-Processor, 通过积分公式法计算其磁场分布, 无须在 Modeller 中进行有限元建模, 其磁场计算准确迅速, 详见 1.2 节。

通过 Opera Manager 打开后处理程序 Post-Processor。建立线圈的几何模型。单击工具栏的 Solenoid 按钮 , 弹出如图 3.3.2 所示的螺管线圈创建对话框。

首先是 Solenoid Parameters 选项卡。Opera3D 中螺管线圈是通过其矩形截面上矩形 4 点的坐标建立的。XP1, YP1 是其中一个点 P1 的  $r$  向和  $z$  向坐标, XP2, YP2, XP3, YP3, XP4, YP4 以此类推, 4 个点 P1, P2, P3, P4 需按照顺时针或逆时针的顺序排列。螺管线圈截面可以是矩形, 也可以是任意四边形。此外, CU1 定义截面上第一个点处的曲率, 即截面可以不是严格四边形的, 而是带有圆角的四边形, 默认为不带圆角, 此时 CU 的值均为 0。

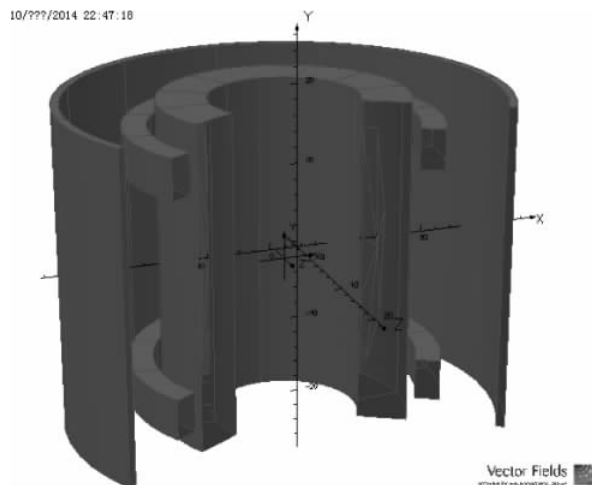


图 3.3.1 超导线圈磁体截面

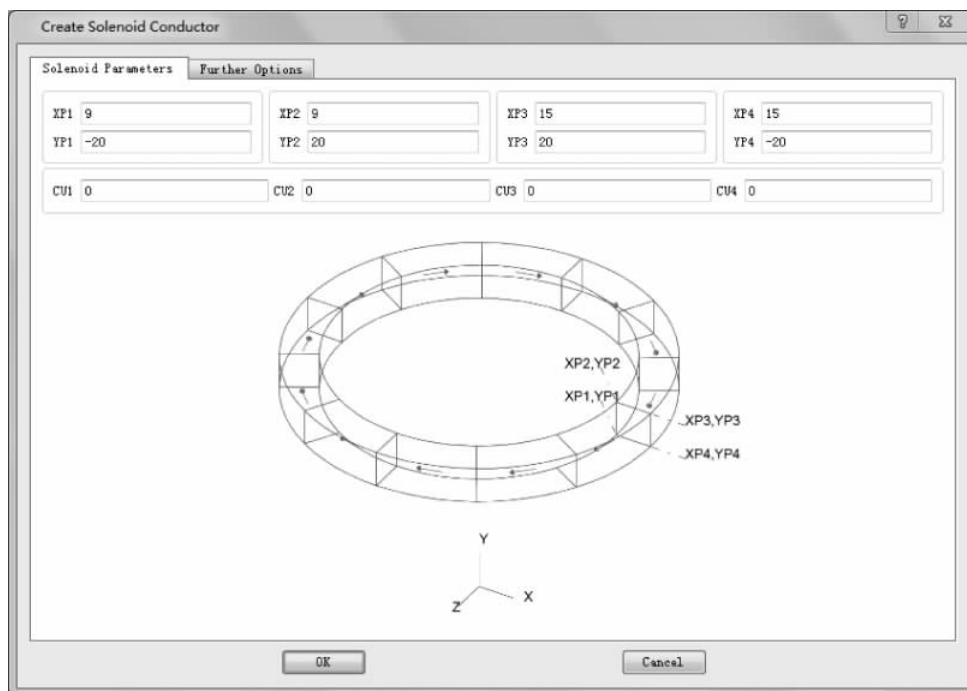


图 3.3.2 线圈创建对话框

单击此对话框中的 Further Options 选项卡,根据图 3.3.3 定义线圈的激励源。

Opera3D 中线圈的激励源有两种,一种是 Biot-Savart 电流源 Biot-Savart current source,此种情况只需定义线圈截面的电流密度 Current density 即可;另一种是电路单元 Circuit element,此种情况是使线圈成为自定义电路中的一个部件,线圈电流通过电路定义。但是对于 TOSCA 静磁场模块,仅可用 Biot-Savart current source,而 Circuit element 可用于 ELEKTRA 暂态场模块。

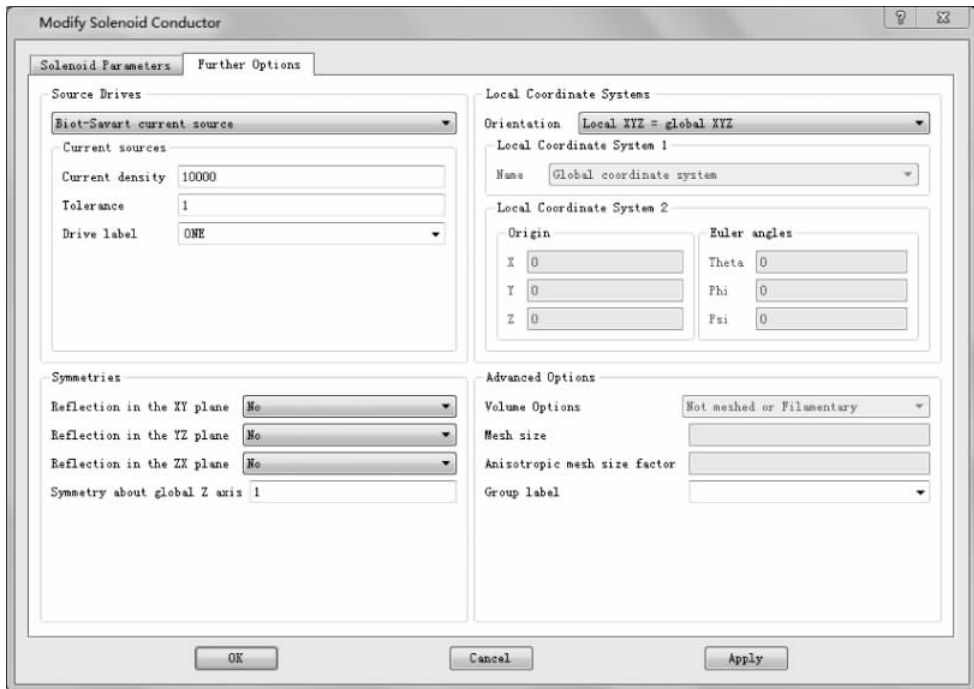


图 3.3.3 定义线圈的激励源对话框

对话框中,Local Coordinate Systems 选项区可以定义线圈的位置和角度; Symmetries 选项区方便定义对称的线圈,例如关于  $xz$  平面对称线圈,或者关于  $z$  轴对称的线圈,这样可以方便建立新的对称线圈; Advanced Options 选项区可定义线圈的有限元网格划分参数,当线圈不仅用于产生磁场时,例如失超 QUENCH 模块中需要计算线圈的温度场时,就须对线圈进行有限元网格划分,在此忽略即可。设置完后单击对话框的 OK 按钮,在主窗口即显示出长的螺管线圈,如图 3.3.4 所示。

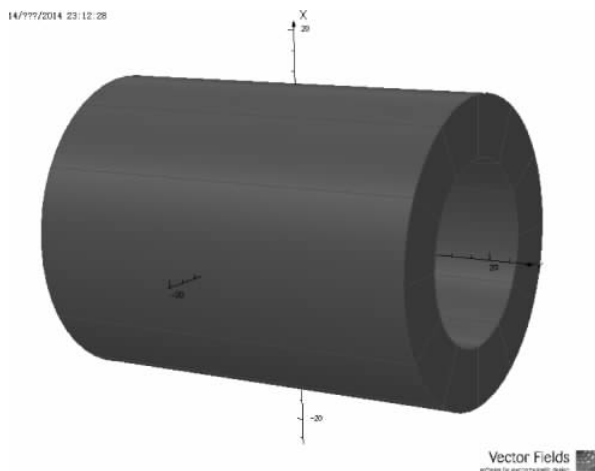


图 3.3.4 创建的长的螺管线圈

按照以上的方法,根据表 3.3.1 创建另外几个螺管线圈的模型。

表 3.3.1 3 个螺管线圈几何参数

Coil No.	R1/cm	R2/cm	Z1/cm	Z2/cm	$J/A \cdot \text{cm}^{-2}$
2	16	19	-17	-12	5000
3	16	19	12	17	5000
4	26	27	-20	20	6000

建好之后,主窗口中即形成 4 个螺管线圈组成的模型,如图 3.3.5 所示。

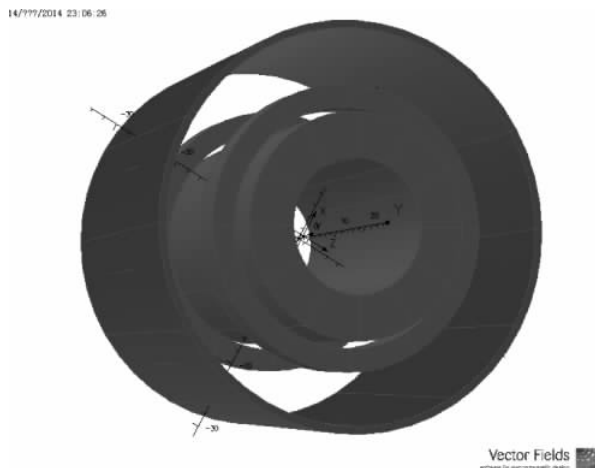






图 3.3.5 创建的 4 个螺管线圈

如果想看到本节一开始的线圈截面图(仅便于显示,而不是实际模型),选择菜单栏命令 View→Cut Plane,打开 Cut Plane 对话框,在左侧下拉菜单中选择 Facets in front of plane, Orientation 选择截面方向 Parallel to XY,即截面为  $xy$  平面,其他选择默认,单击 Select and Refresh 按钮即可显示本节开始的线圈截面图。

如果想对任何一个线圈的参数进行修改,单击工具栏的按钮  选定线圈,然后双击所要修改的线圈,线圈被高亮,再单击工具栏的按钮  弹出线圈建立对话框,进一步进行修改。如果希望删除某一线圈,在高亮选中某一线圈后,单击工具栏的按钮 ,该线圈即被删除。

### 3.3.2 场值计算

单击工具栏的 Fields at a point 选项,在弹出的对话框中输入计算点的直角坐标,再输入计算场值的类型  $F_y$ ,单击 OK 按钮后,弹出显示计算结果窗口。

求某一球面上场值分布。单击工具栏的 Fields on a Spherical Surface 按钮 ,弹出如图 3.3.6 所示的球面场值计算设置对话框。

在对话框中输入场值存储名称 Buffer, Buffer 用于存储计算的场值;输入球面半径 Radius,输入球面上所需计算点的个数 Number of Points,该个数需在两维上进行定义,即球坐标中的经度方向 polar lines 和纬度方向 azimuthal lines 的个数;选择所求场值类型 Component for map 为磁场模 Bmod,单击 Evaluate and Map 按钮,即在主窗口中显示出球



图 3.3.6 球面场值计算设置对话框

面上 Bmod 的分布情况,如图 3.3.7 所示。

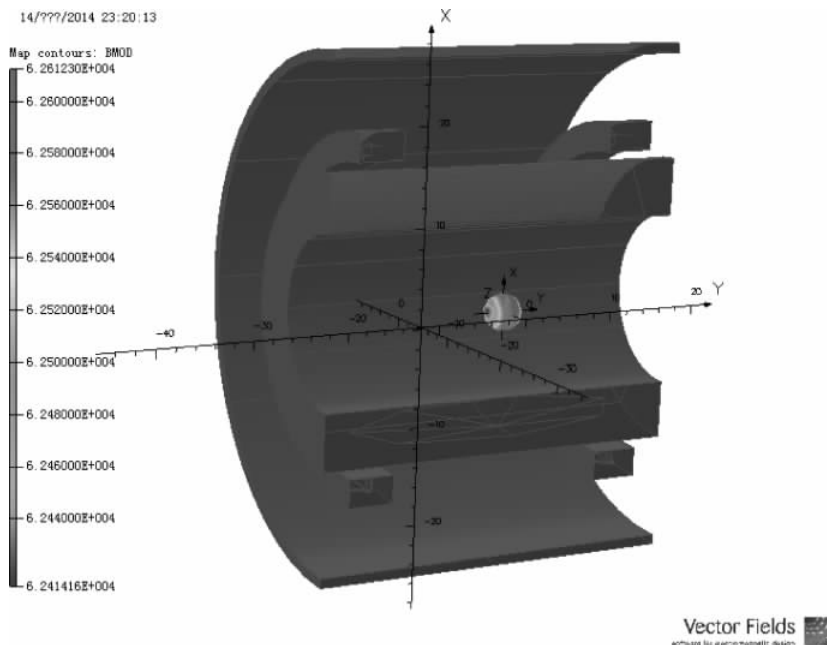


图 3.3.7 球面场值 Bmod 分布

根据左侧的场值分布标尺,可以找到场值的最大值和最小值,并据此计算该磁体的不均匀度,约为 3200ppm。

读者还可以自行尝试求解其他类型区域上的场值。例如矩形面上 Fields on a Cartesian Patch,圆盘上或柱面上 Fields on a Polar Patch 等。

### 3.3.3 结果输出

Opera3D 可以将计算的场值以表格形式输出到文件。方法是单击菜单栏的 Table→Read and Write Table Files 选项,弹出如图 3.3.8 所示的表格输出设置对话框。

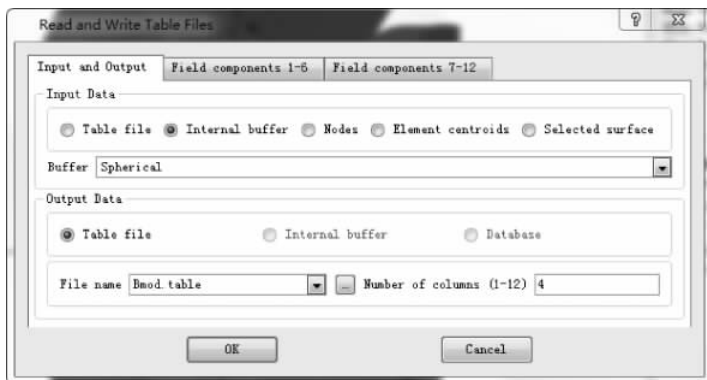


图 3.3.8 表格输出设置对话框

该对话框用于读写文件数据,既可以将 Buffer 等中计算的场值输出到文件中,也可以反过来将文件中的场值输入到 Buffer,以便于耦合其他场的多物理场计算。按照图 3.3.8 所示,在对话框中的 Input and Output 选项卡中输入各参数。选择 Internal buffer 和相应的 Buffer 名称,即将已计算的球面上的场值选中;在 Output Data 选项区中设置输出参数,选择 Table file,输入要写入的文件名或者选择一个文件名,设置 Number of columns,即要输出的表格的列数。Opera3D 输出的表格文件实为一个文本文件,每一列代表一个物理量,一般前 3 列可以为直角坐标的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值,后面几列读者可以自行设置场值类型,默认为 4 列。然后,选择第 2 个选项卡 Field components 1.6,如图 3.3.9 所示。

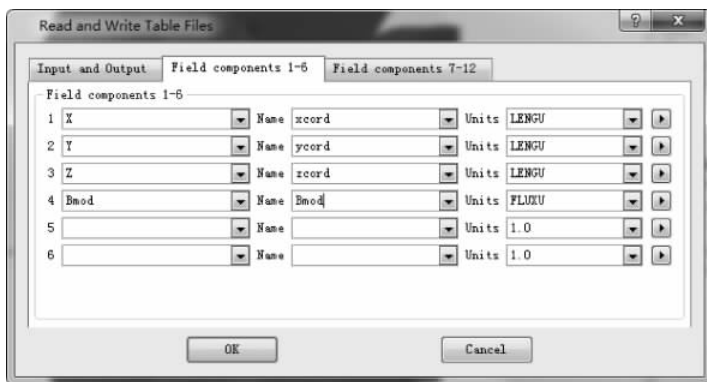


图 3.3.9 设置输出文件每列的物理量

设置输出文件每列的物理量。根据图 3.3.9 设置文件参数,第 1 行为文件中第 1 列的物理量 X(这些物理量为 Opera3D 内部变量,可以直接使用,内部参量介绍可参见《Opera3d Reference Manual》),自定义名称 Name 为 xcord,单位类型为长度 LENGU,同理设置文件中 2~4 列的参数。如果输出文件中的列数很多,还可以扩展到第 3 个选项卡 Field components 7-12,即输出文件最多可以有 12 列。设置完后,单击 OK 按钮,文件即写入所需数据。如果文件不存在则自动建立文件,如果文件已存在,则可以覆盖该文件。输出的文件可以直接用 Windows 自带的写字板或记事本打开,或导入其他数据处理软件进行处理。该文件为 Opera3D 标准输入输出文件,也可以在需要时读入其内容。