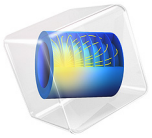
在 COMSOL Multiphysics 6.3 版本中创建



岩层中的爆炸波传播

本模型基于《COMSOL 软件许可协议》 6.3 版本授权。
所有商标均为其各自所有者的财产。请参见 cn.comsol.com/trademarks。

简介

本例对表面上的短时载荷引起的岩体中的波传播进行瞬态分析，此类载荷是隧道施工和其他使用爆破的开挖过程中的典型载荷。还介绍了如何使用低反射边界条件将计算域截断为合理的大小。结果与发表的研究结果非常一致 （见参考资料 1）。

默认情况下，低反射边界条件会从相邻域中获取材料数据，尝试为压力波和剪切波创建完美的阻抗匹配，因此

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = -\rho c_p \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \right) \mathbf{n} - \rho c_s \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \mathbf{t} \right) \mathbf{t}$$

其中 **n** 和 **t** 分别是边界处的单位法向和切向矢量， c_p 和 c_s 是材料中压力波和剪切波的速度。当波方向接近壁的法向时这种方法效果最佳。

有关使用低反射边界条件进行建模的更多信息，请参见参考资料 2。

模型定义

模型几何结构是一个长方体，其中两个侧壁是对称平面，另外两个表示在岩石横向尺寸明显大于深度的方向上计算域的截断。长方体的大小和材料参数与参考资料 1 中研究的一致。

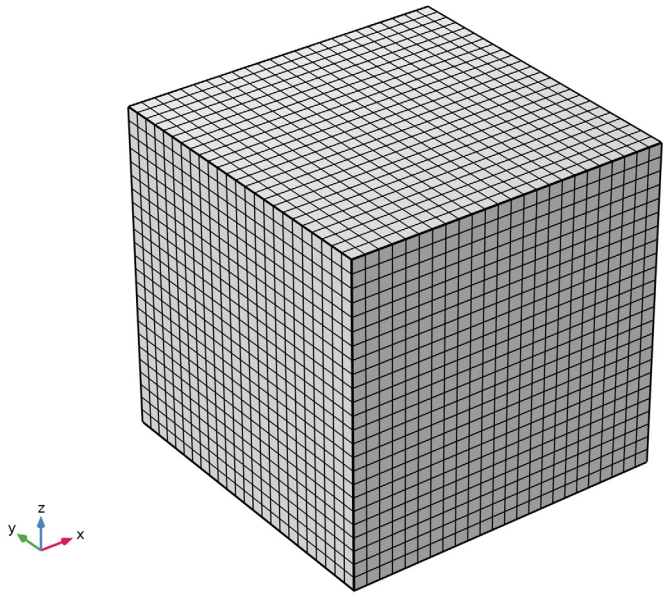


图 1：几何与网格。

因此，使用以下弹性材料数据：杨氏模量 $E = 50$ GPa，泊松比 $\nu = 2/7$，密度 $\rho = 2700$ kg/m^3。这些值代表花岗岩。

上表面是自由表面，而下表面承受以有限持续时间压力脉冲（位于原点附近）形式出现的载荷，见图 2，这类似于参考资料 1 中使用的载荷，表示近地表岩石内的爆炸。

对截断边界分别采用低反射边界条件和无反射边界条件进行建模。

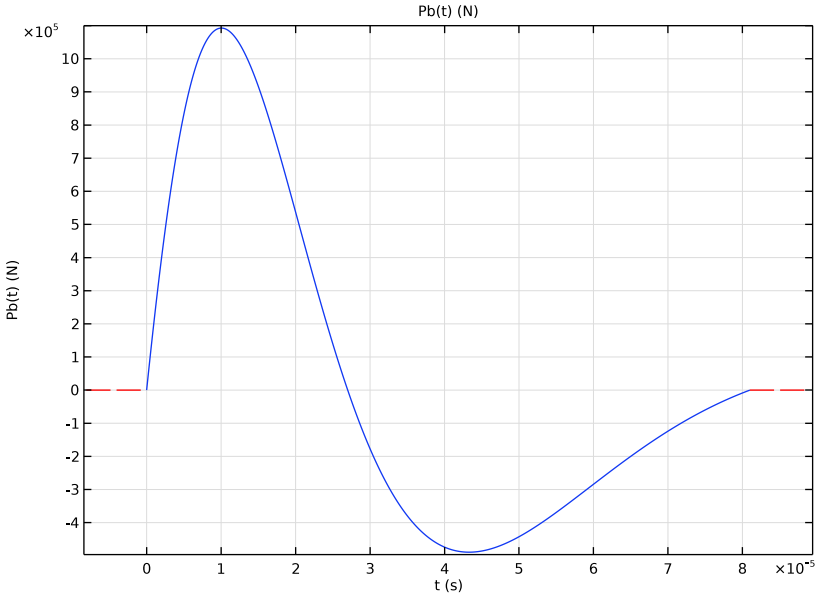


图 2：载荷函数。

结果与讨论

长方体中的波传播通过 150 ms 时间段的瞬态研究进行建模，典型的波传播方向图如图 3 所示。

图 4 显示了使用和不使用低反射边界条件两种情况时上表面的垂直位移。压力波到达地面的时间的解析估计值为 H/c_p，其中 H 是长方体的高度。在反射的情况下，反射压力波到达采样点的时间为 $\sqrt{5}L/c_p$，其中 L 是爆炸点到截断边界的距离。两个估计值都与计算结果非常吻合。随后，如图 4 所示的估计时间之后，两个响应开始相互偏离，这是由反射波引起的。您可以使用空间快速傅里叶变换 (FFT) 分析上表面的波型。波反射开始前后两个时刻的结果分别如图 5 和图 6 所示。图 6 清楚地表明在不使用低反射边界条件进行计算的情况下，从侧边界反射的波的显著影响。

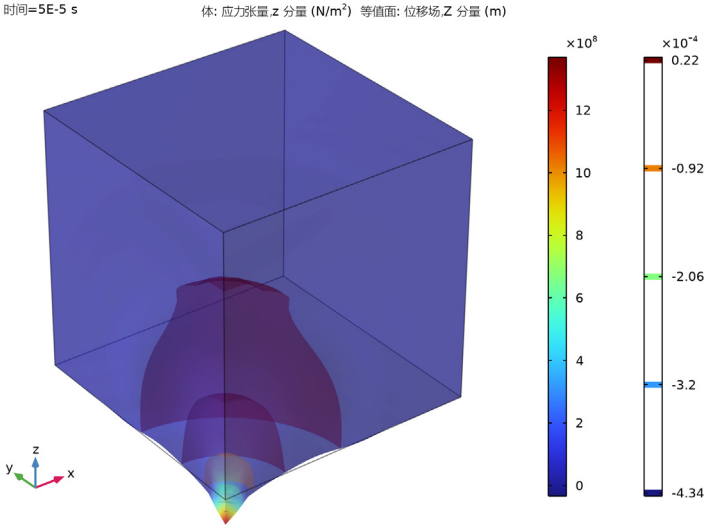


图 3：弹性波传播早期长方体中的应力。

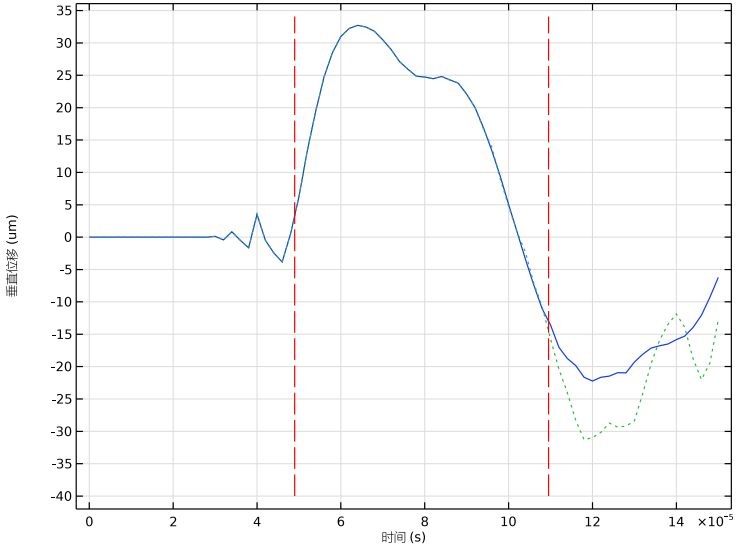


图 4：使用（实线）和不使用（点虚线）低反射边界条件的情况下，上表面的位移。垂直虚线分别表示入射波和反射波到达时间的分析估计值。

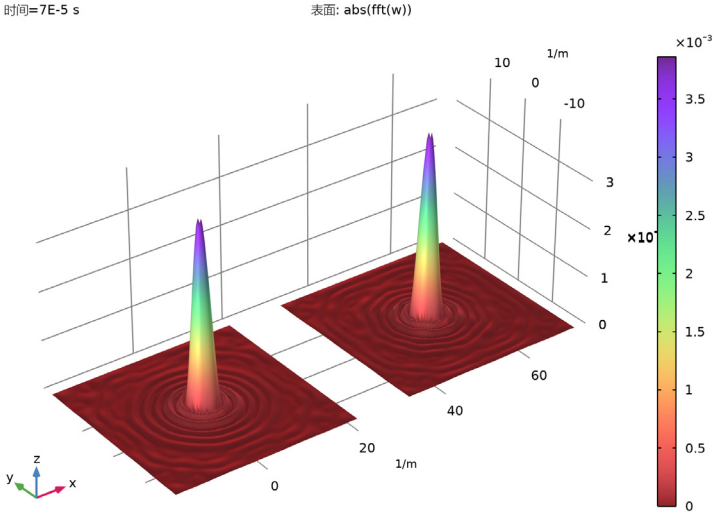


图5：在 t = 7e-5 s 时获取的顶面波型的FFT，以及使用（左）和不使用（右）低反射边界条件得出的计算结果。

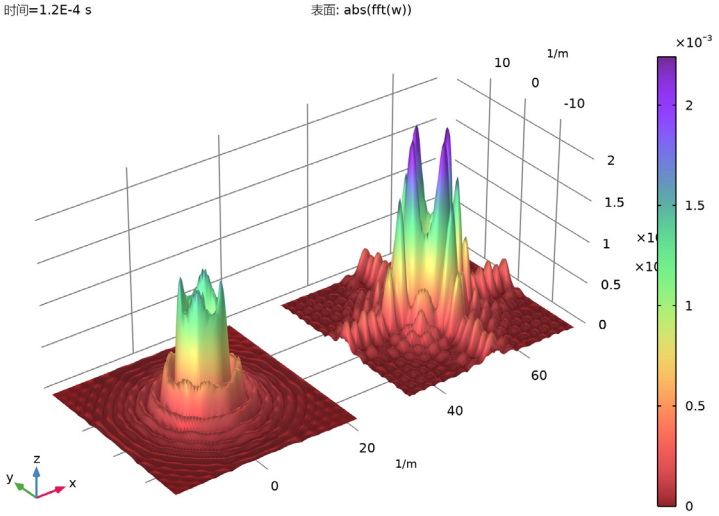


图6：在 t = 1.4e-4 s 时获取的顶面波型的FFT，以及使用（左）和不使用（右）低反射边界条件得出的计算结果。

参考资料

1. H. Sönnerlind, “Beräkningsmetoder för spänningar i explosionsbelastad berg,” rapport nr 001202 (in Swedish), Epsilon HighTech Innovation AB, 2005.

2. M. Cohen and P.C. Jennings, “Silent Boundary Methods for Transient Analysis,” C*omputational Methods for Transient Analysis,* vol. 1, T. Belytschko and T.J.R. Hughes, eds., North-Holland, 1983.

案例库路径：`Structural_Mechanics_Module/Elastic_Waves/blasting_rock`

建模操作说明

从**文件**菜单中选择**新建**。

新建

在**新建**窗口中，单击 **模型向导**。

模型向导

1 在**模型向导**窗口中，单击 **三维**。

2 在**选择物理场**树中选择**结构力学** > **固体力学 (solid)**。

3 单击**添加**。

4 单击 **研究**。

5 在**选择研究**树中选择**一般研究** > **瞬态**。

6 单击 **完成**。

全局定义

定义几何结构和加载参数。

参数 1

1 在**模型开发器**窗口的**全局定义**节点下，单击**参数 1**。

2 在**参数**的**设置**窗口中，定位到**参数**栏。

3 在表中输入以下设置：

名称	表达式	值	描述
H	240[mm]	0.24 m	深度
L	H	0.24 m	宽度
L1	L/24	0.01 m	载荷扩展
Q	1[g]	0.001 kg	炸药量
P0	140e6[N]*(Q/1[kg])^(2/3)	1.4E6 N	载荷大小
t0	0.81e-3[s]*(Q/1[kg])^(1/3)	8.1E-5 s	加载时间
gamma	1.86	1.86	衰减率
u0	50[um]	5E-5 m	位移比例

定义

接下来，定义加载函数。

分段 1 (pw1)

1 在**定义**工具栏中单击 **分段**。

2 在**分段**的**设置**窗口中，在**函数名称**文本框中键入 “Pb”。

3 定位到**定义**栏。在**变元**文本框中键入 “t”。

4 找到**区间**子栏。在表中输入以下设置：

起始	结束	函数
0	t0	P0*exp(-gamma*t/t0)*sin(4*pi/(1+t0/t))

5 定位到**单位**栏。在**变元**文本框中键入 “s”。

6 在**函数**文本框中键入 “N”。

绘制如图 2 所示的函数图。

7 单击 **绘制**。

几何 1

长方体 1 (blk1)

1 在**几何**工具栏中单击 **长方体**。

2 在**长方体**的**设置**窗口中，定位到**大小和形状**栏。

3 在**宽度**文本框中键入 “L”。

4 在**深度**文本框中键入 “L”。

5 在**高度**文本框中键入 “H”。

6 单击 **构建选定对象**。

7 在**几何**工具栏中单击 **全部构建**。

输入与花岗岩相对应的材料参数。

固体力学 (SOLID)

线弹性材料 1

1 在**模型开发器**窗口的**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** 节点下，单击**线弹性材料 1**。

2 在**线弹性材料**的**设置**窗口中，定位到**线弹性材料**栏。

3 从 *E* 列表中选择**用户定义**。在关联文本框中键入 “50[GPa]”。

4 从 ν 列表中选择**用户定义**。在关联文本框中键入 “2/7”。

5 从 ρ 列表中选择**用户定义**。在关联文本框中键入 “2700”。

由于对称性，您只需对四分之一几何结构进行建模。这也解释了载荷表达式中使用的因子 0.25，这是因为载荷是作为总力给出的。

对称 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**对称**。

2 选择 “边界” 1 和 2。

边界载荷 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**边界载荷**。

2 选择 “边界” 3。

3 在**边界载荷**的**设置**窗口中，定位到**力**栏。

4 将 $\mathbf{f}_A$ 矢量指定为

0	x
0	y
0.25*Pb(t)/L1^2*(X<=L1)*(Y<=L1)	z

低反射边界 1

1 在**物理场**工具栏中单击 **边界**，然后选择**低反射边界**。

2 选择 “边界” 5 和 6。

使用线性单元来减少波前的数值弥散。

3 在**模型开发器**窗口中，单击**固体力学 (solid)**。

4 在**固体力学**的**设置**窗口中，单击以展开**离散化**栏。

5 从**位移场**列表中选择**线性**。

网格 1

映射 1

1 在**网格**工具栏中单击 **更多生成器**，然后选择**映射**。

2 选择 “边界” 3。

分布节点中的单元数应写为 `floor(L/L1)`，以便输入整数格式。

分布 1

1 右键单击**映射 1** 并选择**分布**。

2 选择 “边” 2、 3、 7 和 10。

3 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。

4 在**单元数**文本框中键入 “`floor(L/L1)`”。

5 单击 **构建选定对象**。

扫掠 1

在**网格**工具栏中单击 **扫掠**。

分布 1

1 右键单击**扫掠 1** 并选择**分布**。

2 在**分布**的**设置**窗口中，定位到**分布**栏。

3 在**单元数**文本框中键入 “`floor(L/L1)`”。

4 在**模型开发器**窗口中，右键单击**网格 1** 并选择**全部构建**。

5 在**图形**工具栏中单击 **切换到默认视图**按钮。

生成的网格应与图 1 类似。

研究 1

步骤 1：瞬态

1 在**模型开发器**窗口的**研究 1** 节点下，单击**步骤 1： 瞬态**。

2 在**瞬态**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

3 在**输出时步**文本框中键入 “`range(0,2e-6,1.5e-4)`”。

解 1 (sol1)

1 在**研究**工具栏中单击 **显示默认求解器**。

2 在**模型开发器**窗口中展开**解 1 (sol1)** 节点。

位移的默认比例基于几何结构的大小，将其更改为更适合波传播分析的比例。

3 在**模型开发器**窗口中展开**研究 1** > **求解器配置** > **解 1 (sol1)** > **因变量 1**节点，然后单击**位移场 (comp1.u)**。

4 在**场**的**设置**窗口中，定位到**缩放**栏。

5 在**比例因子**文本框中键入 “u0”。

6 在**模型开发器**窗口的**研究 1** > **求解器配置** > **解 1 (sol1)** 节点下，单击**瞬态求解器 1**。

7 在**瞬态求解器**的**设置**窗口中，单击以展开**时间步进**栏。

8 在**放大高频**文本框中键入 “0.5”。

阻尼的这种变化将有助于抑制瞬态解中的数值伪解。

结 果

求解问题之前，准备一个垂直位移分量图，这将在计算过程中显示和更新。

位移

1 在**结果**工具栏中单击 **一维绘图组**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，在**标签**文本框中键入 “位移”。

3 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

点结果图 1

1 右键单击**位移**并选择**点结果图**。

2 选择 “点” 2。

3 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

4 在**表达式**文本框中键入 “w”。

5 在**单位**编辑框中键入 “um”。

研 究 1

步骤 1：瞬态

1 在**模型开发器**窗口的**研究 1** 节点下，单击**步骤 1：瞬态**。

2 在**瞬态**的**设置**窗口中，单击以展开**求解时显示结果**栏。

3 选中**绘制**复选框。

4 在**研究**工具栏中单击 **计算**。

结 果

添加一个类似于图 3 的应力体图。

三维绘图组 2

在**结果**工具栏中单击 **三维绘图组**。

体 1

1 右键单击**三维绘图组 2** 并选择**体**。

2 在**体**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`solid.sz`”。

变形 1

右键单击**体 1** 并选择**变形**。

三维绘图组 2

1 在**三维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

2 从**时间 (s)** 列表中选择 **5E-5**。

3 在**图形**工具栏中单击 **透明**按钮。

4 在**三维绘图组 2** 工具栏中单击 **绘制**。

等值面 1

1 右键单击**三维绘图组 2** 并选择**等值面**。

2 在**等值面**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`w`”。

变形 1

1 右键单击**等值面 1** 并选择**变形**。

2 在**三维绘图组 2** 工具栏中单击 **绘制**。

3 在**图形**工具栏中单击 **切换到默认视图**按钮。

根 节 点

接下来，添加一个新的研究，将禁用低反射边界条件。

添 加 研 究

1 在**主屏幕**工具栏中，单击 **添加研究**以打开**添加研究**窗口。

2 转到**添加研究**窗口。

3 找到**研究**子栏。在**选择研究**树中选择**一般研究** > **瞬态**。

4 单击窗口工具栏中的**添加研究**。

5 在**主屏幕**工具栏中，单击 **添加研究**以关闭**添加研究**窗口。

研究 2

步骤 1：瞬态

1 在**瞬态**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

2 在**输出时步**文本框中键入 “range(0,2e-6,1.5e-4)”。

3 定位到**求解时显示结果**栏。选中**绘制**复选框。

4 定位到**物理场和变量选择**栏。选中**修改研究步骤的模型配置**复选框。

5 在模型树中选择**组件 1 (comp1)** > **固体力学 (solid)** > **低反射边界 1**。

6 右键单击并选择**禁用**。

7 在**模型开发器**窗口中，单击**研究 2**。

8 在**研究**的**设置**窗口中，定位到**研究设置**栏。

9 清除**生成默认绘图**复选框。

通过与第一个研究相同的方式配置求解器

解 2 (sol2)

1 在**研究**工具栏中单击 **显示默认求解器**。

2 在**模型开发器**窗口中展开**解 2 (sol2)** 节点。

3 在**模型开发器**窗口中展开**研究 2** > **求解器配置** > **解 2 (sol2)** > **因变量 1**节点，然后单击**位移场 (comp1.u)**。

4 在**场**的**设置**窗口中，定位到**缩放**栏。

5 在**比例因子**文本框中键入 “u0”。

6 在**模型开发器**窗口的**研究 2** > **求解器配置** > **解 2 (sol2)** 节点下，单击**瞬态求解器 1**。

7 在**瞬态求解器**的**设置**窗口中，定位到**时间步进**栏。

8 在**放大高频**文本框中键入 “0.5”。

结果

点结果图 2

1 在**模型开发器**窗口的**结果** > **位移**节点下，右键单击**点结果图 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**研究 2/ 解 2 (sol2)**。

4 单击以展开**着色和样式**栏。找到**线样式**子栏。从**线**列表中选择**点虚线**。

研究 2

在**研究**工具栏中单击 **计算**。

结 果

位移

添加以下线图，以显示入射和反射压力波撞击长方体表面的估计时间。

点结果图 3

1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**位移**并选择**点结果图**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到 **y 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`(t/t0-1)*40`”。

4 定位到 **x 轴数据**栏。从**参数**列表中选择**表达式**。

5 在**表达式**文本框中键入 “`L/solid.cp`”。

6 选择 “点” 2。

7 定位到**着色和样式**栏。找到**线样式**子栏。从**线**列表中选择**虚线**。

8 从**颜色**列表中选择**红色**。

点结果图 4

1 右键单击**点结果图 3** 并选择**复制粘贴**。

2 在**点结果图**的**设置**窗口中，定位到 **x 轴数据**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`L*sqrt(5)/solid.cp`”。

位移

1 在**模型开发器**窗口中，单击**位移**。

2 在**一维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**绘图设置**栏。

3 选中 **x 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “`时间 (s)`”。

4 选中 **y 轴标签**复选框。在关联文本框中键入 “`垂直位移 (um)`”。

5 在**位移**工具栏中单击 **绘制**。

最终绘图应类似于图 4。

使用空间 FFT 研究波型。

三维镜像 1

在**结果**工具栏中单击 **更多数据集**，然后选择**三维镜像**。

三维镜像 2

1 在**结果**工具栏中单击 **更多数据集**，然后选择**三维镜像**。

2 在**三维镜像**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三维镜像 1**。

4 定位到**平面数据**栏。从**平面**列表中选择 **xz 平面**。

截面 1

1 在**结果**工具栏中单击 **截面**。

2 在**截面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三维镜像 2**。

4 定位到**平面数据**栏。从**平面**列表中选择 **xy 平面**。

5 在 **z 坐标**文本框中键入 “H”。

空间 FFT 1

1 在**结果**工具栏中单击 **更多数据集**，然后选择**空间 FFT**。

2 在**空间 FFT** 的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**截面 1**。

4 定位到**变换**栏。找到**空间分辨率**子栏。从**分辨率**列表中选择**手动**。

5 找到**采样分辨率**子栏。在 N_x 文本框中键入 “20”。

6 找到**空间分辨率**子栏。在 N_y 文本框中键入 “20”。

7 找到**空间布局**子栏。从**布局**列表中选择**使用补零**。

8 在 **x 填充**文本框中键入 “40”。

9 在 **y 填充**文本框中键入 “40”。

三维镜像 1, 三维镜像 2, 截面 1, 空间 FFT 1

1 在**模型开发器**窗口的**结果** > **数据集**下，按住 Ctrl 并单击以选择**三维镜像 1**、**三维镜像 2**、**截面 1** 和**空间 FFT 1**。

2 右键单击并选择**复制粘贴**。

三维镜像 3

1 在**三维镜像**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

2 从**数据集**列表中选择**研究 2/ 解 2 (sol2)**。

三维镜像 4

1 在**模型开发器**窗口中，单击**三维镜像 4**。

2 在**三维镜像**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三维镜像 3**。

截面 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**截面 2**。

2 在**截面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**三维镜像 4**。

空间 FFT 2

1 在**模型开发器**窗口中，单击**空间 FFT 2**。

2 在**空间 FFT** 的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**截面 2**。

二维绘图组 3

1 在**结果**工具栏中单击 **二维绘图组**。

2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**空间 FFT 1**。

4 从**时间 (s)** 列表中选择 **7E-5**。

5 定位到**绘图设置**栏。清除**绘制数据集的边**复选框。

6 单击以展开**绘图阵列**栏。选中**启用**复选框。

表面 1

1 右键单击**二维绘图组 3** 并选择**表面**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**表达式**栏。

3 在**表达式**文本框中键入 “`abs(fft(w))`”。

4 定位到**着色和样式**栏。从**颜色表**列表中选择 **SpectrumLight**。

5 从**颜色表转换**列表中选择**反转**。

高度表达式 1

右键单击**表面 1** 并选择**高度表达式**。

表面 2

1 在**模型开发器**窗口的**结果** > **二维绘图组 3** 节点下，右键单击**表面 1** 并选择**复制粘贴**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**数据集**列表中选择**空间 FFT 2**。

4 从**时间 (s)** 列表中选择 **7E-5**。

5 单击以展开**标题**栏。从**标题类型**列表中选择**无**。

6 单击以展开**继承样式**栏。从**绘图**列表中选择**表面 1**。

7 在**二维绘图组 3** 工具栏中单击 **绘制**。

二维绘图组 4

1 在**模型开发器**窗口的**结果**节点下，右键单击**二维绘图组 3** 并选择**复制粘贴**。

2 在**二维绘图组**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**时间 (s)** 列表中选择 **1.2E-4**。

表面 2

1 在**模型开发器**窗口中展开**二维绘图组 4** 节点，然后单击**表面 2**。

2 在**表面**的**设置**窗口中，定位到**数据**栏。

3 从**时间 (s)** 列表中选择 **1.2E-4**。

4 在**二维绘图组 4** 工具栏中单击 **绘制**。