

CST工作室套装™丛书4



CST 微波工作室®

应用算例



三维高频无源器件及天线仿真

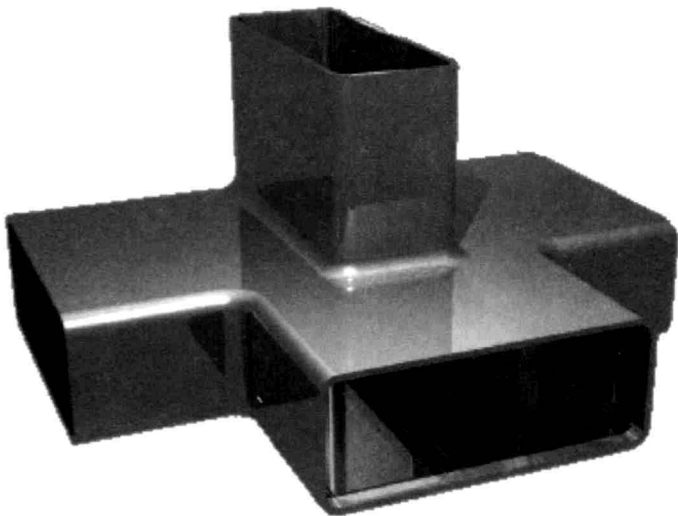
CST China

CST 微波工作室[®]

应用算例

矩形波导	3
同轴结构	21
平面器件	51
天 线	77
谐 振 器	111
滤 波 器	129

矩形波导



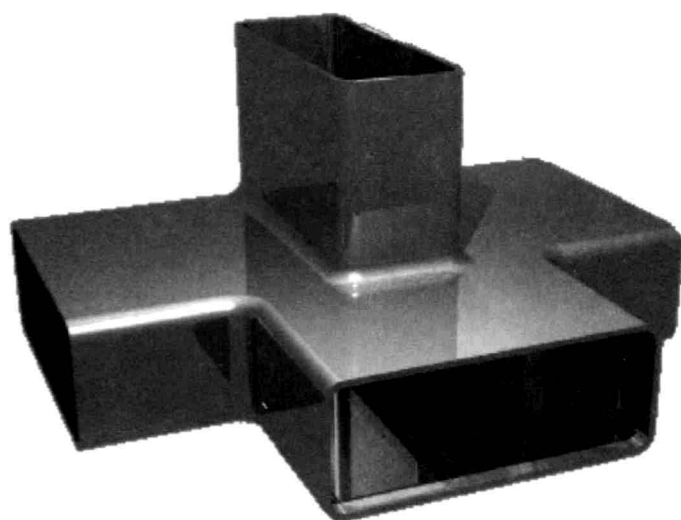
几何建模及求解器设置.....	4
概述及模型尺寸.....	4
几何建模.....	4
场值和 S 参量计算	10
时域求解器	10
时域求解结果	11
精度分析.....	13
频域求解器	15
频域求解结果	17
精度分析.....	19
获取更多信息	20

CST 微波工作室[®]

应用算例

矩形波导	3
同轴结构	21
平面器件	51
天 线	77
谐 振 器	111
滤 波 器	129

矩形波导



几何建模及求解器设置.....	4
概述及模型尺寸.....	4
几何建模.....	4
场值和 S 参量计算	10
时域求解器	10
时域求解结果	11
精度分析.....	13
频域求解器	15
频域求解结果	17
精度分析.....	19
获取更多信息	20

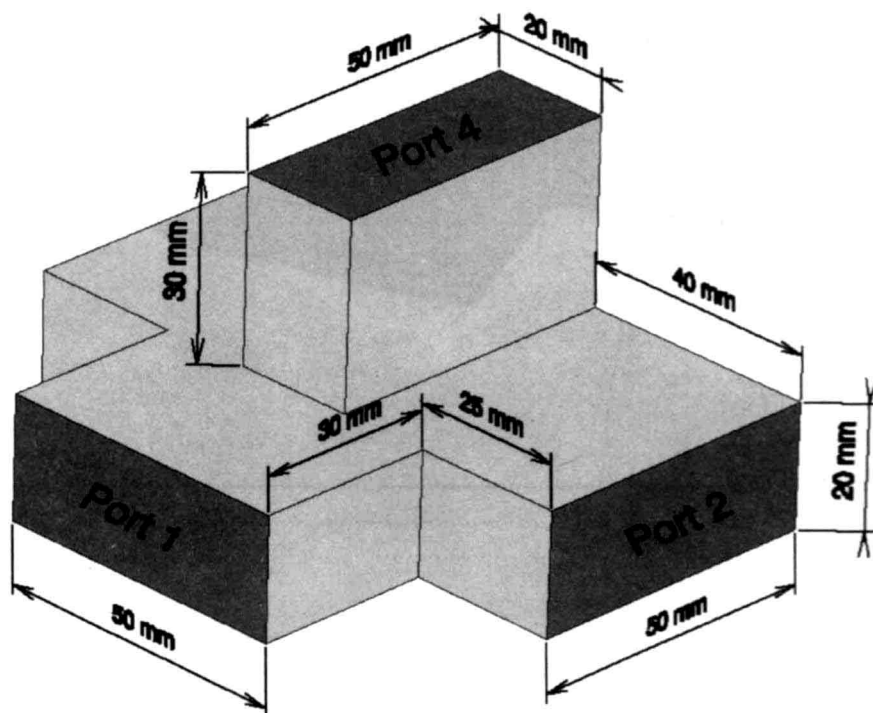
几何建模及求解器设置

概述及模型尺寸

本教程中，我们将介绍如何仿真矩形波导器件。作为矩形波导的典型例子，我们将分析一个著名的常用高频器件：魔 T。这里介绍的建模和分析器件的知识也可以应用到其他含有矩形波导的设备中。

魔 T 实质上是 E 面 T 接头与 H 面 T 接头的混合网络（结构图及尺寸见下）。尽管 CST 微波工作室®能提供各种各样的结果，本教程只关注魔 T 的 S 参量和电场。本例中，端口 1 和端口 4 是隔离的，所以 S₁₄ 和 S₄₁ 理应非常小。

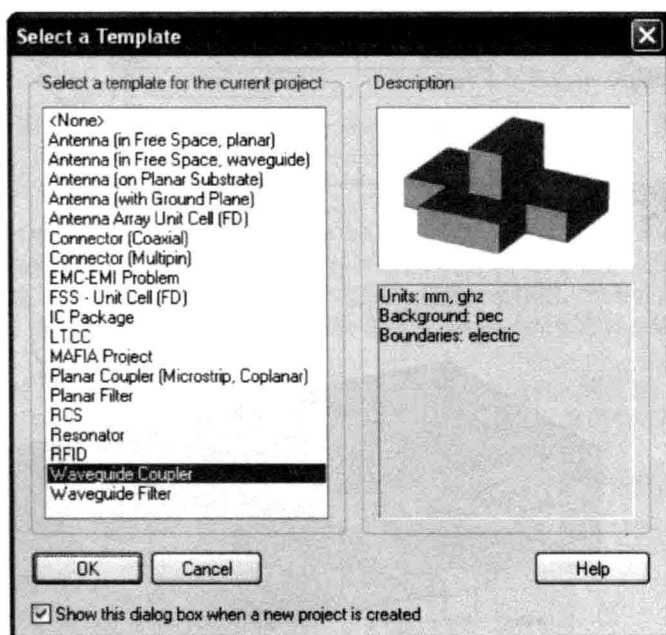
我们强烈建议您在开始本教程前，详细阅读《CST 微波工作室®基础入门》。



几何建模

□ 选择模板

启动 CST 设计环境™后，请选择创建一个新的 CST 微波工作室®项目，此时系统会要求您选择一个最适合您欲仿真器件的模板。这里我们选择“Waveguide Coupler”。

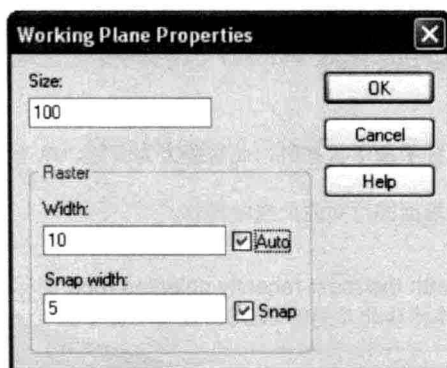


此模板自动将单位设为 mm 和 GHz，背景材料设为 PEC（这也是系统的缺省设置），且所有的边界都为电边界。

因背景材料（此背景材料自动填充除已建模型之外的空间）已经被设置为理想导体，故您只需建模器件的空气填充部分。对此魔 T 来说，三个相连的方块已足以将其完整描述。

□ 定义工作平面

下一步，我们需要设定一个相对您的器件来说足够大的工作平面。因为本结构在坐标轴方向的最大延伸 100mm，故工作平面的大小应至少设定为 100mm。从主菜单中选择 **Edit ⇨ Working Plane Properties**，即可打开平面设置对话框，更改此设置。请注意，我们将遵循和《CST 微波工作室®基础入门》相同的版式约定。



更改工作平面属性窗口中的设置为上图中的数据后，点击 OK 按钮。

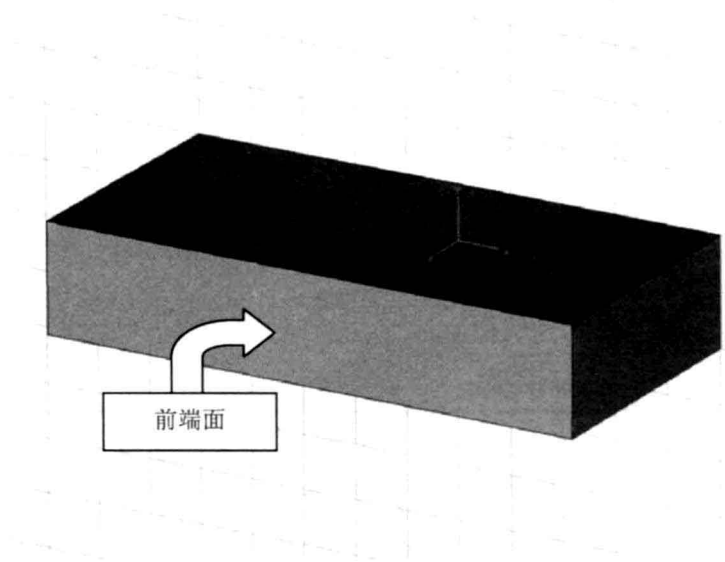
□ 定义第一个方块

现在开始定义第一个方块：

完成此任务最简单的途径是点击“Create brick”图标  或从主菜单中选择 **Objects ⇨ Basic Shapes ⇨ Brick**。

CST 微波工作室®现在要求您输入方块的第一个点。绘图窗口右下角的信息框中显示了鼠标指针的当前坐标。当时 $x=50$ ， $y=10$ 时，双击鼠标。这时信息框中除了显示鼠标指针的当前坐标外，还将显示当前位置与前一被选点之间的距离（DX 和 DY）。拖动矩形框，使得 $DX=-100$ ， $DY=-20$ ，并双击确定。CST 微波工作室®现在切换到高度输入模式。拖动高度框，使得 $h=50$ ，然后双击鼠标，完成建模。现在您可以看到半透明的方块和用于输入参数的对话框。如果您在鼠标输入阶段有误，可通过编辑对话框中的数值来更改。此处我们以缺省组件和缺省材料来创建此方块，故请点击 OK 按钮。下表总结了您用鼠标输入时的各参数：

Xmin	-50
Xmax	50
Ymin	-10
Ymax	10
Zmin	0
Zmax	50



现在您已建好连接端口 2 和端口 3 的波导。我们将引入 CST 微波工作室®的另一功能——工作坐标系（WCS）来添加接端口 1 的波导。用它可以省去您在建模阶段的计算。下面将继续建模，您也将发现此工具优越性。

□ 将 WCS 与第一个方块的前端面对齐

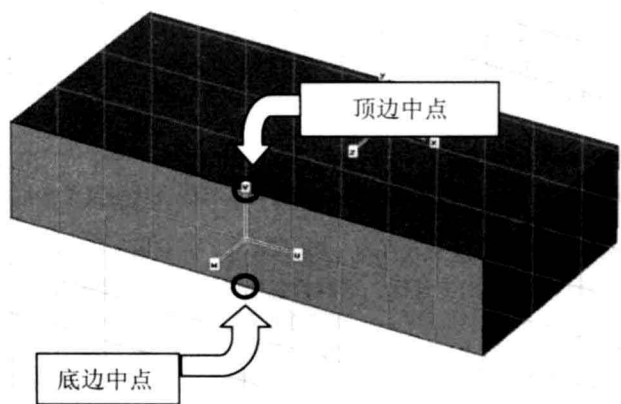
如上图示，我们将从第一个方块的前端面添加接端口 1 的波导。请任选以下方式之一，激活“选面”工具：

- 1. “选面”图标
- 2. *Objects* ⇌ *Pick* ⇌ *Pick Face*
- 3. 快捷键：*f*

注意：只有当主窗口处于激活状态时，此快捷方为有效。单击主窗口便可将其激活。

直接双击此方块的前端面即可完成此选取操作。

点击“Align the WCS with the most recently selected face”图标 （或使用快捷键 *w*），将工作坐标与最后选择的面对齐。此操作将移动并旋转 WCS，使得工作平面（*uv* 平面）与所选端面一致。



□ 定义第二个方块

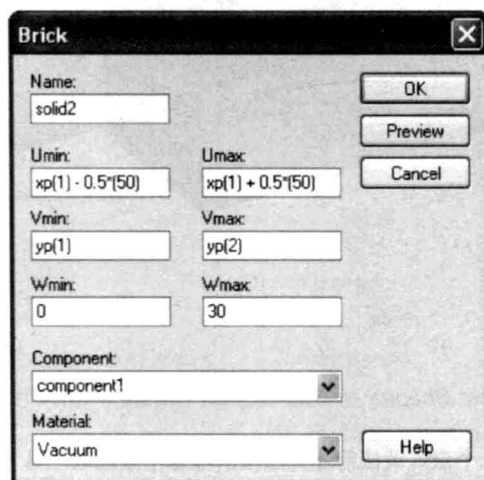
当 WCS 与所选端面对齐后，可以很轻松地创建第二个方块。从主菜单选择 *Objects* ⇨ *Basic Shapes* ⇨ *Brick*，或是点击相应的图标，启动方块创建模式。请记住，只要 WCS 被激活，则建模时所有的数值都是相对于 uvw 坐标系而言的。

如上图所示，新建方块应与第一个方块的棱边中点对齐。在当前的创建方块（“Create brick”）模式下，激活合适的选点工具（*Objects* ⇨ *Pick* ⇨ *Pick Edge Midpoint* 或用快捷键 *m*），此时所有的棱边都呈高亮状态，请双击第一个方块的底边，选择底边中点。再按同样的方法选择顶边中点，以便继续创建方块。

选取了位于同一条直线上的两个点后，还需要您输入方块的宽度。请注意，如果先前的两个点已经形成矩形（不在一条直线上），就会跳过这一步。请拖动方块宽度到 $w=50$ （此坐标可在绘图窗口的右下角观察到）并双击确定。

最后是指定方块的高度。请拖动鼠标到合适的高度（ $h=30$ ）并双击确定。请注意，除了用鼠标来指定坐标位置外（如我们这里所做的），您还可以在需要指定坐标时按下键 **TAB**。这时会打开一个对话框，以便您直接输入此点的坐标数值。

此方块的交互式建模过程完成后，会再次弹出一个对话框，列出此方块的所有参数。

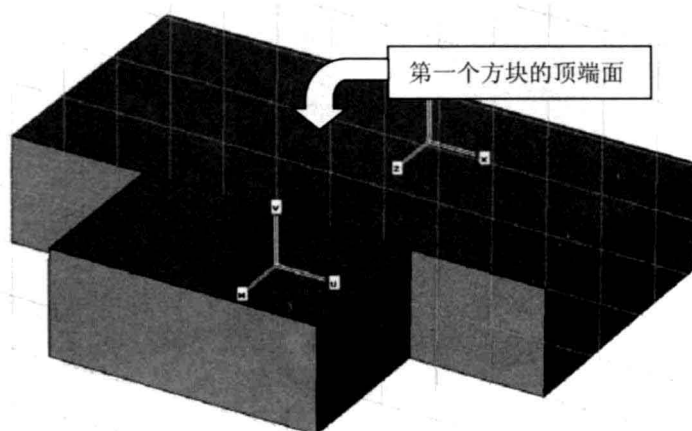


因为有些点是用选取工具输入的，所以对话框中的一些坐标栏中含有数学表达式。函数 $xp(1)$ 、 $yp(1)$ 是您选取的第一点的坐标（第一个方块底边的中点）。同理，函数 $xp(2)$ 和 $yp(2)$ 代表顶边的中点。

因为我们构建的是波导内腔，所以仍保持缺省的“Vacuum” Material 和与第一个方块相同的 Component (“component1”) 不变。

注意:使用组件，您可以将几个不同材料的物体划分为一个特定的组群。本例中，在一个组件下创建所有的结构也是很方便的。

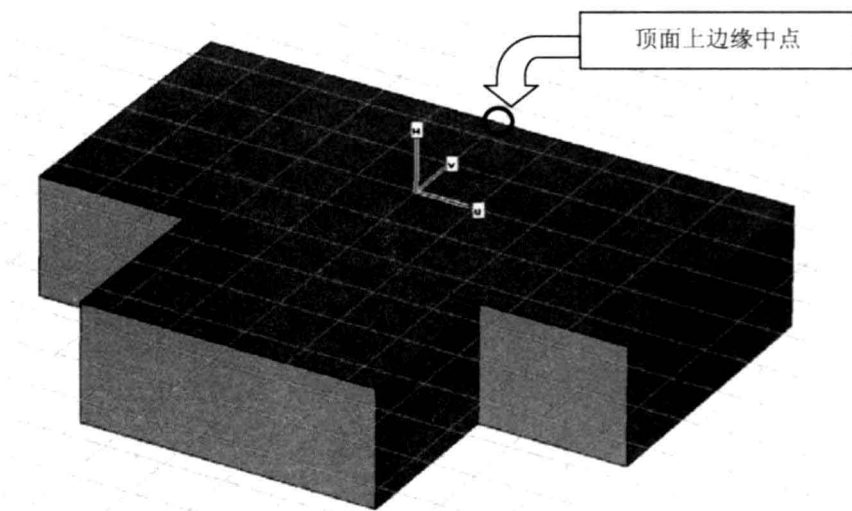
最后点击按钮确认。现在让我们来创建第三个方块。



□ 将 WCS 与第一个方块的顶端面对齐

下一个方块与第一个方块的顶面对齐。将局部坐标系与此面对齐，请先激活选面模式（，*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face* 或快捷键 *f*）并双击此面。

然后，点击“Align the WCS with the most recently selected face”图标，或从主菜单中选择 *WCS* ⇒ *Align WCS with Selected Face*，亦可使用快捷键 *w*。



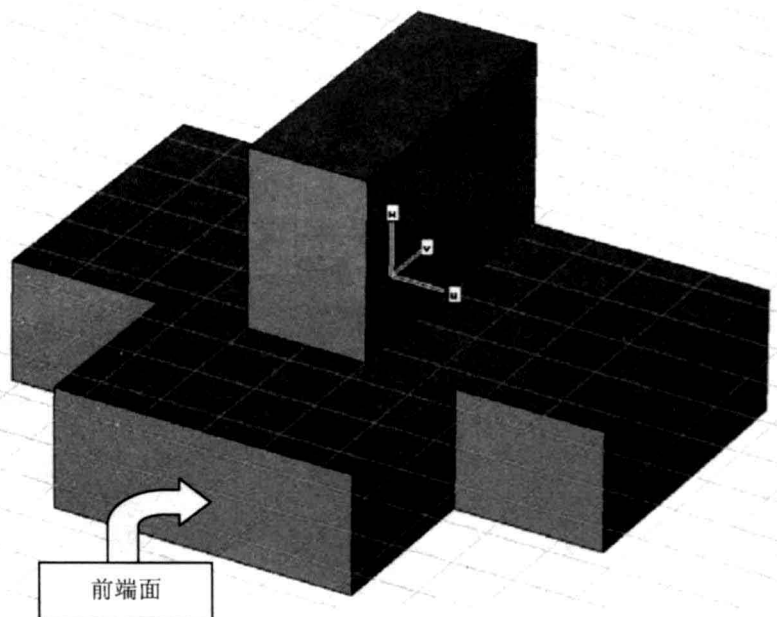
□ 创建第三个方块

选择 *Objects* ⇒ *Basic Shapes* ⇒ *Brick* 或点击“Create a brick”图标，激活方块创建模式创建第三个方块。

现在需要您输入第一个点，请按前述方法激活边缘中点选取工具（快捷键 *m*），并双击顶面上边缘的中点（见上图）。

再往 $-v$ 方向拖动鼠标，拉伸 50（拖动鼠标时按住键 *Shift*，以限制坐标只在 v 方向移动）并双击。然后用同样的方法指定方块的宽度 $w=20$ ，高度 $h=30$ ，也可按下 *Tab* 键，直接输入数值。

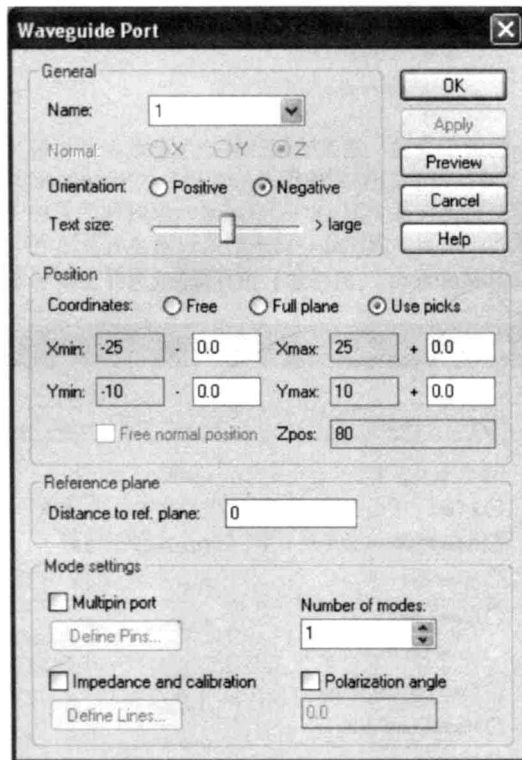
最后一个方块也是 *vacuum* 材料，并同样归属于“component1”。在方块创建对话框中确认这些设置后，结构如下图所示：



□ 定义端口 1

接下来是在魔 T（请见上图）的前端面设置第一个端口。最简单的方式是先激活选面工具（, **Objects** ⇒ **Pick** ⇒ **Pick Face** 或快捷键 **f**），然后双击相应的面。

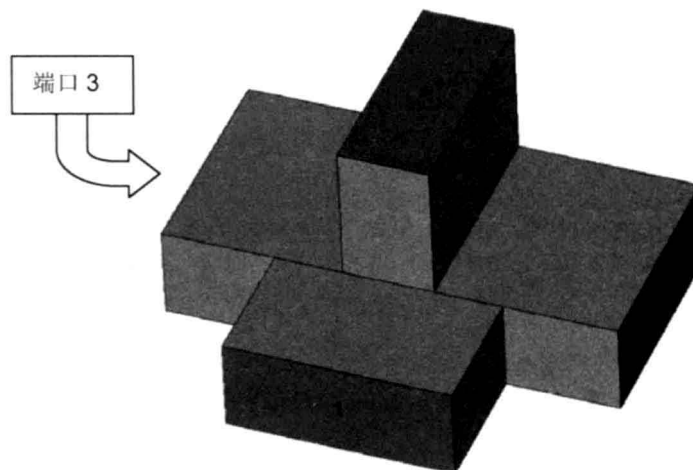
选好端面后，请从主菜单中选择 **Solve** ⇒ **Waveguide Ports** 或点击定义波导端口图标 ，打开波导端口定义对话框。波导端口对话框会由预先选定的单元（面、边或点）确定出边界框，自动指定端口的范围和位置。



本例中，您只需接受缺省设置即可。请点击 **OK** 按钮，创建第一个端口。下一步是定义端口 2，3，4。

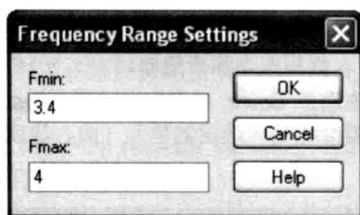
□ 定义端口 2，3，4

重复最后几个步骤（选取面和创建端口），定义端口 2、端口 3、端口 4。全部完成后，您的模型如下图所示。请在继续后面的设置之前仔细地检查您的输入。



□ 定义频率范围

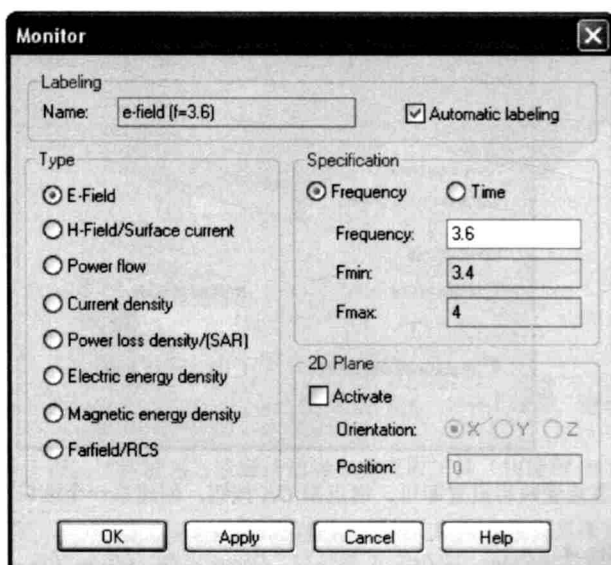
本例的频率范围是 3.4 GHz 到 4 GHz。将频率范围设置对话框中（点击  “Frequency range” 图标或是选择 **Solve** ⇒ **Frequency**）中的 **Fmin** 和 **Fmax** 变更为您所需要的数值，点击 **OK** 按钮保存设置。请注意，当前的单位设置见状态条。



□ 定义场监视

即使是对一个相对较小的例子来说，宽带时域计算产生的数据量也极为庞大，所以有必要在仿真开始前指定所要存储的场值类型。CST 微波工作室®使用“监视器”（“monitors”）的概念来指定需要存储的场值类型。除了场值类型，您还需要指定在某个固定的频点或是一段时间的采样中来记录场值。您可以定义足够多的不同频率不同场类型或域的监视器。请注意，过多的监视器会显著地增加仿真所需的内存占用。

要增加场监视器，请点击“Monitors”（监视器）图标或选择主菜单 *Solve* ⇨ *Field Monitors*。



本例中，请定义一个 *Frequency* 为 3.6 GHz 的电场监视器（*Type* = *E-Field*），点击 *OK* 按钮保存设置。主视图中显示的绿色盒子表明要储存的场的体积范围。

场值和 **S** 参量计算

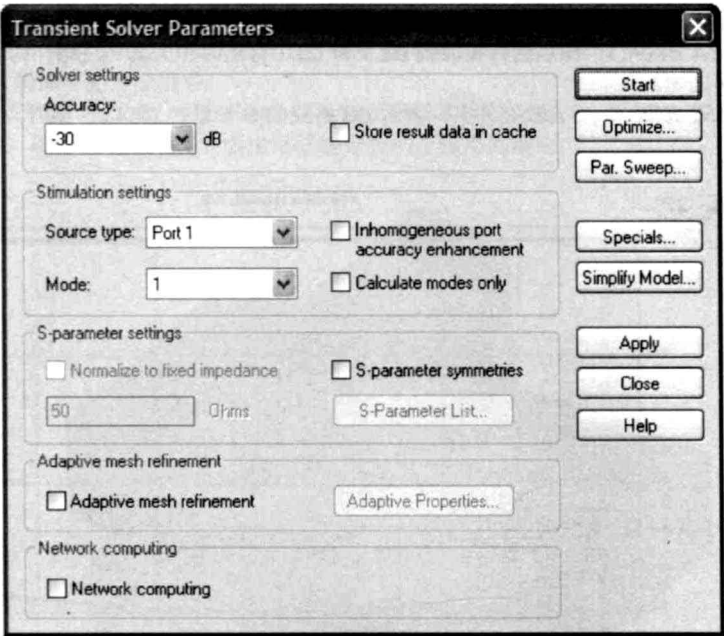
CST 微波工作室®的一个特点是“基于需求的求解”（*Method on Demand*）方法，因而可以根据不同的问题选择最合适的求解器和网格设置。另一优点是可以将完全不同的方法的求解结果进行比较。下面的章节中将分别在时域和频域求解器中计算 **S** 参量和场值，您将看到这一特点的强大功能。本例中，时域仿真采用六面体网格，而频域求解器采用四面体网格。这两部分是相互独立的，根据您要使用的求解器，选择其中的一部分仔细阅读即可。频域求解部分还介绍了频域求解结果与时域求解结果的比较。

请注意，由于口令的限制，某个求解器也许不可用，请与我们联系以获取更多信息。

时域求解器

□ 时域求解器设置

选择主菜单 *Solve* ⇨ *Transient Solver* 或点击 “Transient solver” 图标，可打开求解器控制对话框，在此定义时域求解器参数：



您需要指定是计算整个 S 参量矩阵，还是只计算其中的一部分。对魔 T 来说，我们最关心的端口 1 的输入反射和端口 1 到端口 2, 3, 4 的传输。

因此，我们只需要计算 S1,1, S2,1, S3,1 和 S4,1，这些均可由 1 端口来激励。所以，请将 *Stimulation settings* 框中的 *Source type* 改为 *Port 1*。如果您保持原设置（*All Ports*）不变，则将计算整个 S 参量。

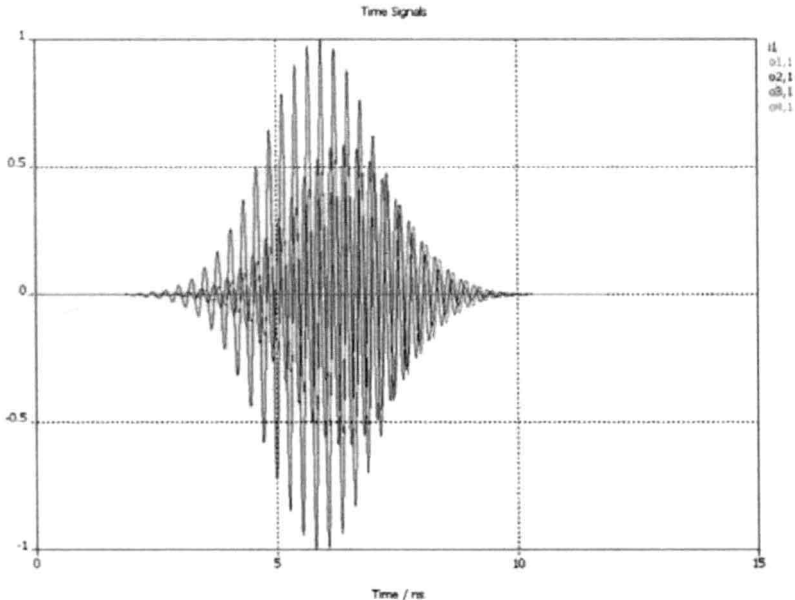
最后，点击 *Start* 按钮开始计算。状态栏中会出现进度条，显示有关当前计算状态的信息。如果求解过程中发现任何错误或警告信息，求解器都会在消息窗口中将其显示出来。只要需要，该消息窗口就自动激活。

时域求解结果

恭喜您！您已经成功地仿真了魔 T。现在让我们来看一下结果。

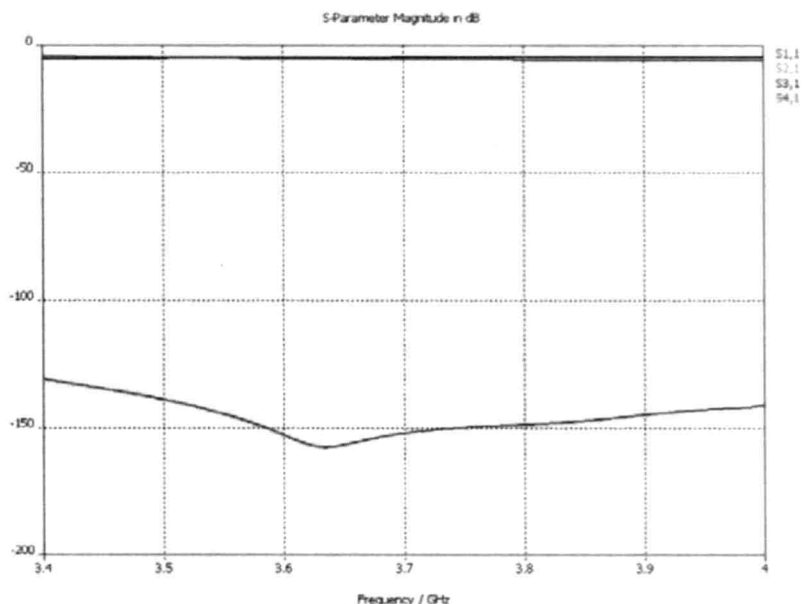
□ 1D 结果（端口信号、S 参量）

首先，观察端口信号。打开导航树中 *1D Results* 文件夹并点击 *Port signals*。



此图显示了入射、反射及传输波幅度随时间的变化。入射波幅度称为 $i1$ ，反射波幅度为 $o1,1$ ，传输波幅度为 $o2,1$ ， $o3,1$ 和 $o4,1$ 。图示的传输波幅 $o2,1$ 和 $o3,1$ 有延时和失真（注意，因 $o2,1$ 和 $o3,1$ 重合，所以您只能看到其中之一）。

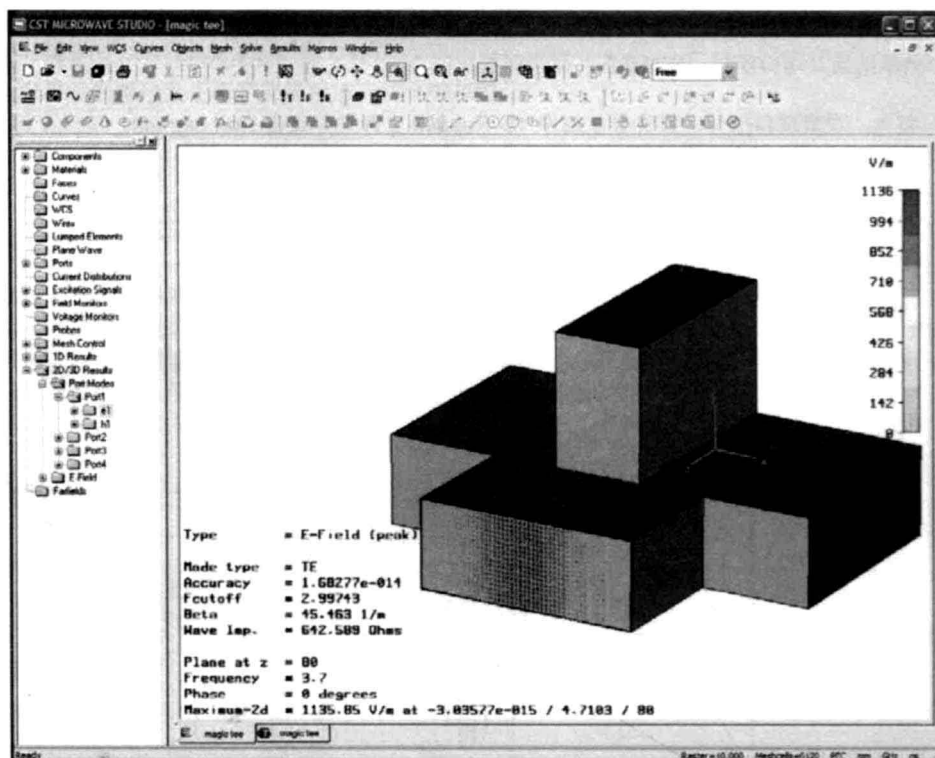
点击 **1D Results** ⇨ **/S/dB** 文件夹，查看 dB 格式的 S 参量。



如我们所预期，端口 4 的传输（ $S4,1$ ）非常地小（已经接近求解器噪声系数的底线 -150 dB）。显然，此类简单设备的匹配很差，所以端口 2 和 3 的传输与端口 1 的输入反射幅度在同一数量级上。

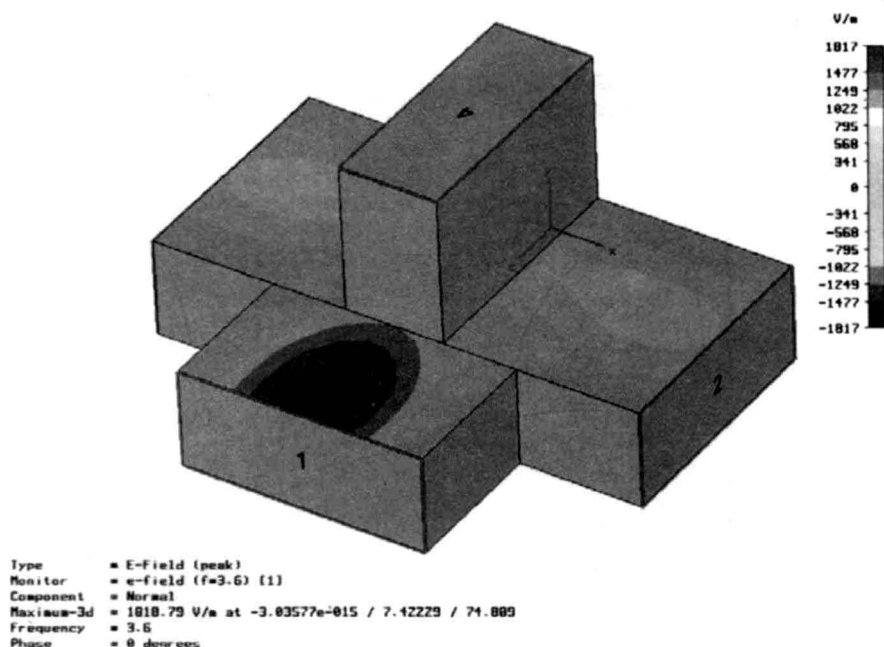
□ 2D 和 3D 结果 (端口模式及场监视)

最后是观察 2D 和 3D 场结果。首先查看端口模式。打开导航树的 **2D/3D Results** ⇨ **Port Modes** ⇨ **Port1** 文件夹，再点击子文件夹 **e1**，即可查看基模的端口电场分布。



因为选择的是整个子文件夹，所以看到的是 3D 矢量图。选择该子文件夹下的每一项，都可以看到一个相应的标量图。这些图同样可以显示端口模式的一些重要特性，例如模式类型、截止频率和传播常数等。其他端口的端口模式可用同样的方法查看。

选择导航树的 **2D/3D Results** ⇒ **E-Field** ⇒ **efield (f=3.6)[1]** 文件夹，可看到魔 T 的完整的三维电场分布。点击 **Normal** 项，场图将显示结构表面电场法线分量的三维等高线图。



选择右键菜单（在绘图窗口点击鼠标右键）上的 **Animate Fields** 选项，便可看到场的动态显示。要改变视图显示，请从主菜单选择 **Results** ⇒ **Plot Properties** 或右键菜单 **Plot Properties**，打开视图属性对话框。双击视图同样可以打开此对话框。

精度分析

本例中，时域 S 参量计算的数值误差来源主要有两个：

1. 有限的仿真时间造成的数字截断误差。
2. 有限的网格分辨率造成的误差。

以下我们将告诉您，怎样控制这些误差以及怎样得到高精度的结果。

□ 有限的仿真时间造成的数字截断误差

时域求解器由一个高斯脉冲在输入端口的激励，算出器件内部的时变场分布。因此，端口处的信号是其基本解，再由此经过傅立叶变换导出 S 参量。

即使时间信号本身的精度非常高，经过傅立叶变换也会引入数字误差。除非最终的时间信号完全衰减到零，不然会在 S 参量里引入纹波，影响结果的精度。仿真结束时，激励信号的幅度称为截断误差。纹波的幅度随截断误差的变大而变大。

请注意：纹波不会移动 S 参量曲线最大值和最小值的位置。因此，如果您仅仅对峰值的位置感兴趣，较大的截断误差也是可以容忍的。

在时域求解器控制对话框中，通过设定 **Accuracy** 参数，可以控制截断误差。对于连接器来说，其缺省设置为 -30 dB 即可提供足够精确的结果。然而，对于波导结构，要获得高精度的结果，有时需要将求解精度提高到 -40 dB 或 -50 dB。

由于提高仿真精度要求在减少截断误差的同时增加了仿真时间，所以需要权衡利弊。一般来说，可以使用下表来判断：

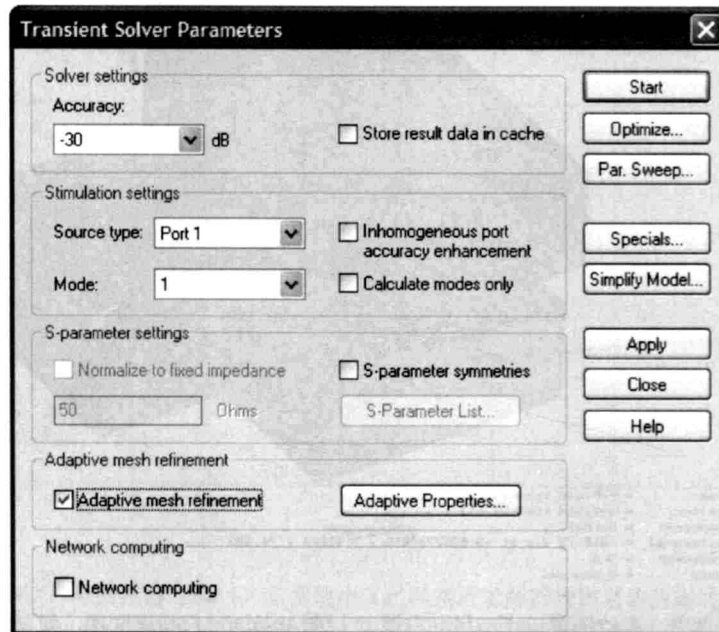
要求的精度	精度设定（求解器控制对话框）
中	-30dB
高	-40dB
很高	-50dB

如果 S 参量有较大的纹波，便有必要提高求解器的精度设定，或是使用自回溯滤波器（AR-Filter）特性。请参考《CST 微波工作室®高级概念》和在线帮助以获取更多信息。

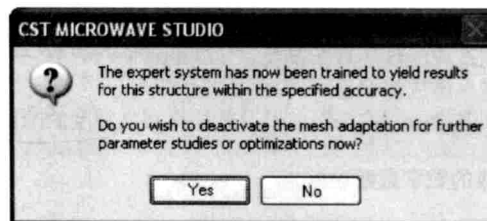
□ 网格分辨率对 S 参量精度的影响

有限的网格分辨率造成的误差通常更难消除。要保证解的精度，唯一的方法是提高网格分辨率并重新计算 S 参量。如果网格密度增大后，结果变换不大，便可证明结果已经收敛。

本例中，我们使用专家系统自动生成的缺省的网格设置。要提高结果精度，最简单的方法是将求解器控制对话框 (*Solve* ⇌ *Transient Solver* ) 中 *Adaptive mesh refinement* 项打钩，使用完全自动的自适应网格加密：



激活自适应网格加密后，点击 **Start** 按钮，启动求解器。只需几分钟（求解器完成几次自动网格加密运算），将弹出以下对话框：



此对话框告诉您，自动网格加密已经将专家系统的设置调整到给定的精度（缺省为 2%），在下面的计算中（如：参数扫描或优化），您可以关掉此自适应过程。

请点击 *Yes* 按钮，确定您不用再进行自适应网格加密。

自适应网格加密结束后，请选择导航树 *1D Results* ⇌ *Adaptive Meshing* ⇌ *Delta S*，查看前后两次运算所得 S 参量的最大误差：