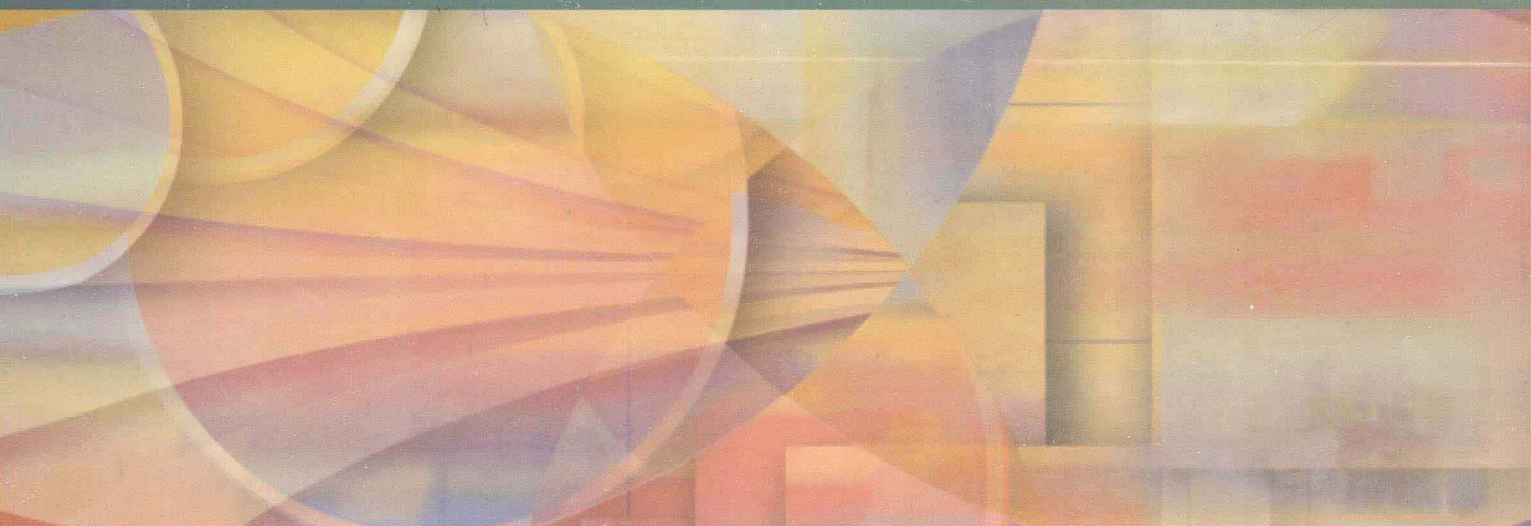


CST工作室套装™丛书 9



CST 微波工作室®

实用算例汇编



天线 | RCS | SI | TDR | EMC/EMI | 手机 SAR
滤波器 | 连接器 | 定向耦合器 | 环流器 | 功分器

CST China

B. 2011.12.28 (+60d) 关于本书

CST 工作室套装™丛书 9 《CST 微波工作室* – 实用算例汇编》

天线 | RCS | SI | TDR | EMC/EMI | 手机 SAR | 滤波器 | 连接器 | 定向耦合器 | 环流器 | 功分器

本书取材于实际工程应用、公开发表的文献以及测试考题，力求真实实用。某些算例为保密起见，做了“去功能”处理，故性能并非最优，请读者谅解。

CST 微波工作室*内含七个求解器：时域有限积分（TD），频域有限元（FEM），矩量法（MoM），多层快速多极子（MLFMM），模式降阶（MOR），模式分析（MA）和本征模（E）。全部是全波精确算法（又称低频算法）。

- 时域有限积分（TD）的应用范围最广，适用于宽带/超宽带、电中/电大、任意复杂结构、任意介质分布、时域反射分析等的 S 参量、辐射与散射问题的仿真。对辐射与散射问题尤其适用。
- 频域有限元（FEM）适用于窄带、电中、任意结构、任意介质的 S 参量、辐射与散射问题的仿真。更适用于 S 参量问题。
- 矩量法（MOM）适用于窄带、电小、任意结构、任意介质的 S 参量、辐射与散射问题的仿真。
- 多层快速多极子（MLFMM）适用于窄带、超电大金属凸结构的散射问题的仿真。
- 模式降阶（MOR）适用于高 Q 值窄带、金属腔体滤波器 S 参量问题的仿真（不含场）。
- 模式分析（MA）适用于窄带滤波器 S 参量问题的仿真（含场）。
- 本征模（E）用于求解封闭结构的复本征值及其对应的本征模式场。

下表给出了上述各类全波算法关于结构电尺寸、介质分布、边值问题类型等因素的定性的适用范围。

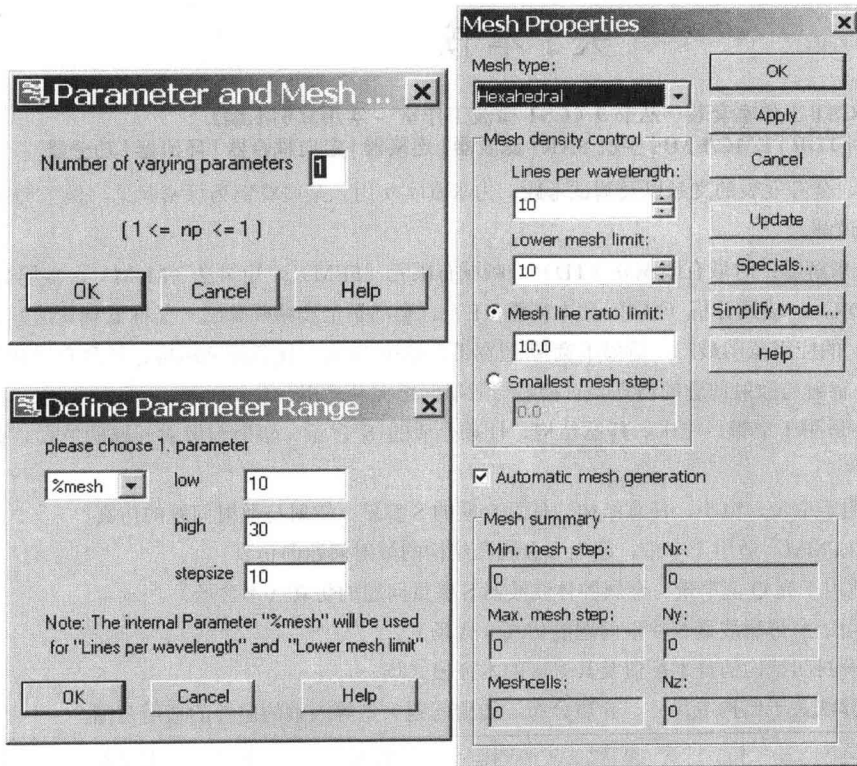
	电小 $D/\lambda \leq 10$	电中 $10 < D/\lambda \leq 50$	电大 $50 < D/\lambda \leq 200$	超电大 $200 < D/\lambda \leq 500$
任意复杂结构 (一般介质分布 或 PEC)	S: MoM, FEM, TD, MOR, MA	S: TD, FEM, MOR	S: TD	S: -
	RS: MoM, FEM, TD, (MLFMM)	RS: TD, FEM, (MLFMM)	RS: TD, (MLFMM)	RS: (MLFMM)
任意介质分布 (一般结构复杂 度)	S: MoM, FEM, TD, MOR, MA	S: TD, FEM, MOR	S: TD	S: -
	RS: MoM, FEM, TD	RS: TD, FEM	RS: TD	RS: -
超宽带结构	S: TD, MoM, FEM	S: TD, FEM	S: TD	S: -
	RS: TD, MoM, FEM, MLFMM	RS: TD, FEM, MLFMM	RS: TD, MLFMM	RS: MLFMM
高 Q 值窄带谐振 结构	MoM, MOR, FEM, MA, TD+AR	MOR, FEM, TD+AR, MA	TD+AR	实际中几乎没有微波频 段此类的应用
任意金属凸结构 散射问题	MoM, MLFMM, TD, FEM	MLFMM, TD, FEM	MLFMM, TD	MLFMM
任意金属腔体结 构散射问题	MoM, TD, FEM, MLFMM	TD, MLFMM, FEM	TD	目前尚无精确的全波算 法。高频算法无法精确 求解任意腔体散射问 题。

D: 为物体最大尺寸; S: 表示 S 参量问题; RS: 表示辐射和散射问题; AR: 指自回朔滤波器; 括号(MLFMM)表示视具体情况而定

本书共给出 45 个算例，其中 23 个天线，4 个 RCS，3 个 FSS，2 个巴仑、5 个滤波器功分器环流器，2 个波纹喇叭，4 个连接器（TDR/SI/SPICE），1 个屏蔽盒电磁兼容/电磁干扰（EMC/EMI），1 个手机比吸收率（SAR）。每个算例自成体系，可以独立阅读参考。所有算例均做了网格收敛性分析，得到正确可信的结果。

频域有限元求解器通常是采用自适应网格来保证结果的收敛可信的。而对于时域有限积分求解器来说，我们通常是通过对比 2 至 3 次网格加密所得到的计算结果，人工确定其收敛与否的方法来确定最终结果的收敛可信度。我们不推荐在时域求解器中勾选自适应网格选项，而推荐使用内置的网格加密收敛性分析工具，它能够快捷地得到收敛的结果。本书中的所有算例都有这方面的介绍，它也是本书的重点之处。希望读者认真掌握。收敛性加密工具可以这样启动：从主菜单中选择 Macros $\Rightarrow$ Wizard $\Rightarrow$ Parameter + Mesh Study，点击 OK 按钮便得左下图对话框。改变 low、high、stepsize 分别为 10、

30、10，它表示在下面右图中的 *Line per wavelength /Lower mesh limit* 分别为 10/10、20/20 和 30/30 三种网格设置，程序自动计算三次。并将三次计算的结果放在一起比对。



本书绝大多数算例是用时域求解器（TD）完成的，有些算例则采用了多种方法进行求解，给出了不同方法的收敛结果。每个算例开始处给出了获得收敛结果所用的求解时间和峰值内存值，最后给出该算例的参考文献。

本书所有算例是在双路双核志强 5160 处理器、主频 3.0GHz、Windows X64 操作系统下完成的。读者在实际计算时由于处理器的差异和机器负荷情况的不同，CPU 时间可能会有所差异。

本书篇幅较大，编写时间仓促，一定会有不少文字上的错误和设置上的优化，衷心希望读者的善意反馈，以便我们及时更正。本书仍在不断地完善，今后将出版增订版，加入新的算例和新的求解方法，给广大读者以更多的选择参考思路。

本书所有算例都有完整的 CST 模型和计算结果（基于 CST STUDIO SUITE™ v2006B.SP4 版本），原则上只选择性地提供给具有此版本及其以上版本的 CST 正式用户，敬请谅解。

本书需要读者具有 CST 微波工作室和 CST 设计工作室™的基本知识，可以参考 CST 工作室套装™丛书 1-8。

本书版权归上海软波工程软件公司（CST China Ltd.）所有，不得翻印，侵权必究 © CST China 2007。

目 录

第一部分 天线

第一章 UWB 天线	1
算例 01: Vivaldi 天线	1
算例 02: 等角螺旋天线	25
算例 03: 补等角对数平面螺旋天线	53
算例 04: 阿基米德平面螺旋天线	83
第二章 螺旋天线	105
算例 05: 四臂螺旋天线	105
算例 06: 圆锥对数螺旋天线	135
第三章 平板缝隙阵天线	155
算例 07: 单脉冲雷达天线	155
算例 08: 双馈赋形波束缝隙阵天线	171
算例 09: 圆柱共形缝隙阵天线	191
第四章 阵列天线	207
算例 10: 微带阵列天线	207
算例 11: 四单元微带天线	227
算例 12: Vivaldi 天线阵列	251
算例 13: 波导窄边裂缝阵列天线	293
第五章 反射面天线	319
算例 14: 卡塞格伦天线	319
算例 15: 环焦天线	347
算例 16: 极化反射面天线	381
第六章 振子天线	405

算例 17: 套筒天线.....	405
算例 18: 短波天线阵.....	423
第七章 特种天线	441
算例 19: 分形天线.....	441
算例 20: RFID 天线.....	459
算例 21: 龙伯透镜.....	487
算例 22: 手机天线.....	513
算例 23: 基站天线.....	541
第八章 波纹喇叭	573
算例 24: 径向槽波纹喇叭.....	573
算例 25: 轴向槽波纹喇叭.....	599
第九章 FSS 和 EBG	617
算例 26: Y 形 FSS	617
算例 27: 双 Y 型 FSS	649
算例 28: 棱锥形吸波器.....	675
第十章 巴 仑	691
算例 29: 同轴尖劈巴仑.....	691
算例 30: 微带线巴仑.....	719

第二部分 RCS

第十一章 经典问题	739
算例 31: 金属球 RCS.....	739
算例 32: 金属 Ogive 的 RCS	765
第十二章 腔体与进气道	787
算例 33: 进气道 RCS.....	787
第十三章 整机.....	829

算例 34: F117 整机 RCS	829
--------------------------	-----

第三部分 连接器

第十四章 TDR 分析	841
算例 35: 同轴结构的 TDR	841
第十五章 SI 分析	857
算例 36: 多层 PCB 差分线	857
算例 37: 8 层 IC 差分线	887
第十六章 SPICE 模型	905
算例 38: RJ45 接头	905

第四部分 EMC/EMI

第十七章 屏蔽机箱 EMI	923
算例 39: EMC-box	923

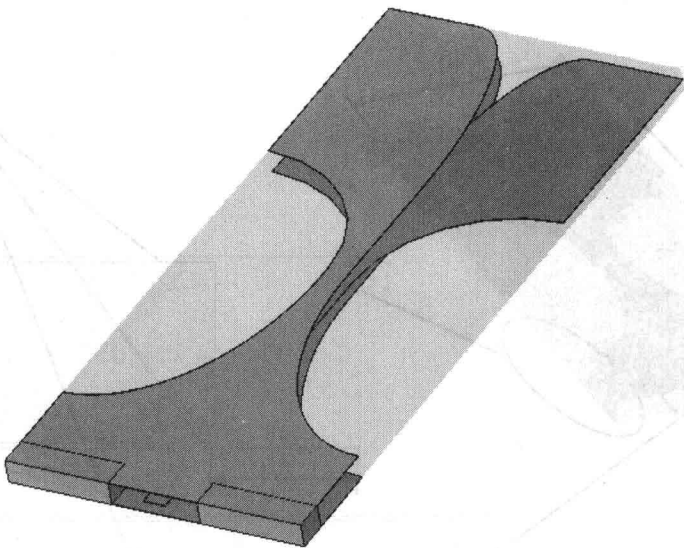
第五部分 常用微波器件

第十八章 滤波器	955
算例 40: 8 阶腔体滤波器	955
算例 41: LTCC 双工器	967
第十九章 功分器	981
算例 42: 1 分 16 功分器	981
算例 43: 3dB 定向耦合器	1001
第二十章 环流器	1023
算例 44: 环流器	1023
第二十一章 SAR 分析	1043
算例 45: 手机 SAR 计算	1043

第一部分 天 线

第一章 UWB 天线

算例 01: Vivaldi 天线



Vivaldi 天线是一种按照指数规律渐变的槽线天线。由于它具有非周期性结构逐渐变化的特点，理论上，它有很宽的频带。本算例的 Vivaldi 天线模型来自《Microwave Engineering Europe》（欧洲微波工程）杂志 2000 年的 CAD 考题，仿真验证了 Vivaldi 天线在宽频带内的良好特性。

仿真统计信息

	时域求解器
网格数	343,710
仿真时间	2m 40s
使用内存	170MB

几何建模	2
介绍及模型尺寸	2
修改模型步骤	2
常用求解器设置	10
S 参量和场计算	14
收敛性分析	21
仿真时间内存统计	21
总结	22
获取更多信息	22
参考文献	23

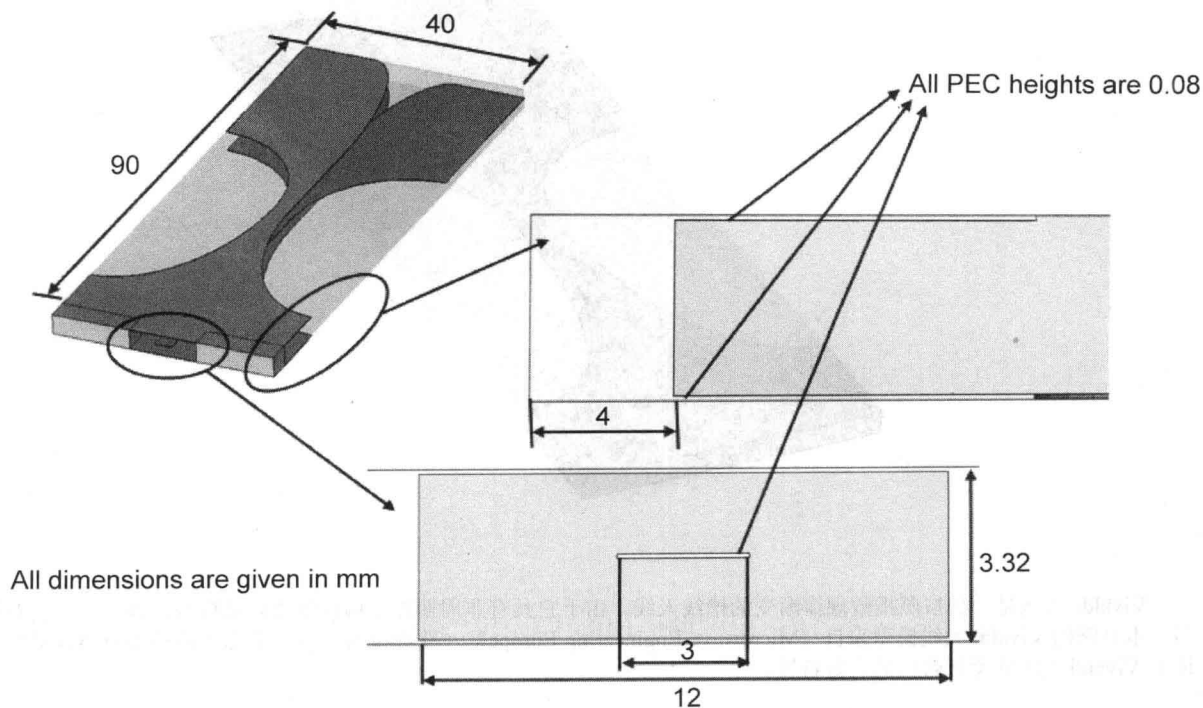
几何建模

介绍及模型尺寸

本教程中，我们将介绍如何仿真 Vivaldi 天线。

CST 微波工作室®能提供各种各样的结果，本教程中，我们将关注 S 参量、表面电流、远场方向图、宽带增益和交叉极化/共面极化方向图，最后是结果的收敛性分析。

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》和《CST 微波工作室® - 应用算例》。



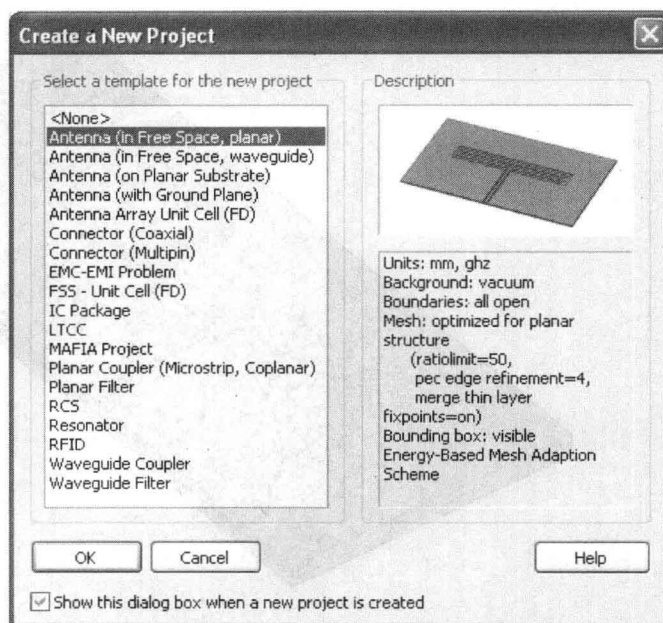
上图所示的结构为 MWEE 标准 Vivaldi 天线，包含两种不同的材料：Rogers RT5870 介质（介电常数：2.33）和金属（PEC）。

修改模型步骤

本教程将帮助您一步步地完成模型的导入和模型的修改，同时也会提供相应的屏幕拷贝，以便您随时检查您的模型。

□ 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“Antenna (in Free Space, planar)”。



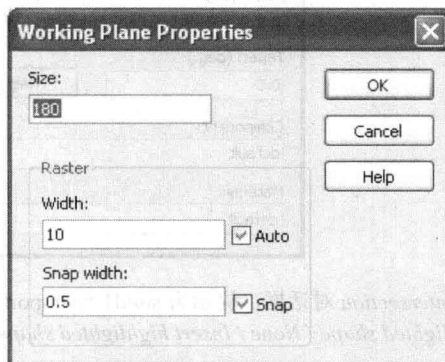
此模板自动将单位设为 mm 和 GHz，背景材料设为 Normal 且所有的边界都设为 open add space。

□ 设置单位

正如上面所说，选择好的模板会自动将单位设置为 mm/GHz/ns，您无需更改。

□ 设置工作平面

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。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。



根据此例器件的尺寸，在该对话框中，请将 *Size* 设为 180（状态条中将显示先前设定好的 mm 单位）。将 *Raster width* 和 *Snap width* 分别设置为 10 和 0.5，以得到一个合适的栅格间距。请点击 *OK* 按钮确认。

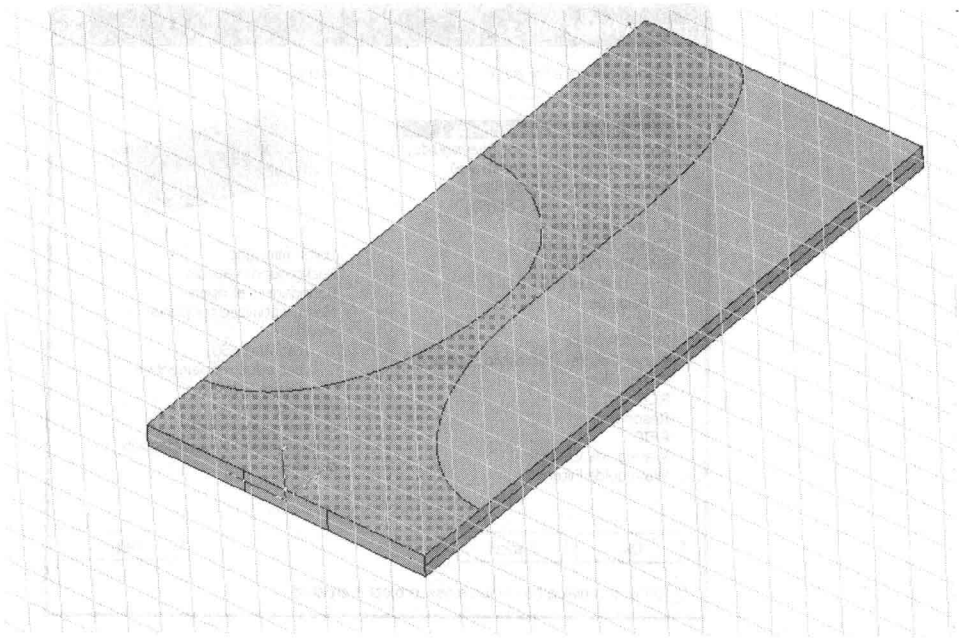
□ 导入模型

您完全可以在 CST 微波工作室®中直接建模 Vivaldi 天线，本例中我们关注的是天线的宽频带特性和交叉极化特性等，故不详细介绍模型的创建过程，而是利用 CST 微波工作室®强大的模型导入功能直接导入仿真模型。请激活模型导入模式（*File ⇨ Import ⇨ SAT (up to R16)*）。在弹出的对话框中选择模型的路径，点击确定即可。

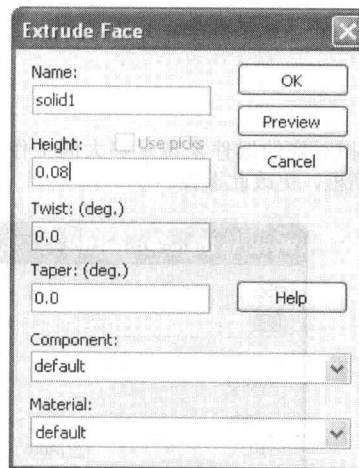
□ 修改模型

在执行导入操作时，除金属外的所有材料的属性都恢复为 Normal，故需要为介质材料指定材料属性。另外，对模型进行适当的修正可以大大提高仿真的效率。

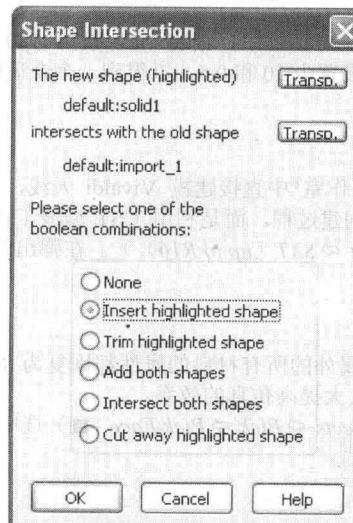
首先请您用选面工具（*Objects ⇨ Pick ⇨ Pick Face*, ) 选中模型的上面金属片 (import_2)。



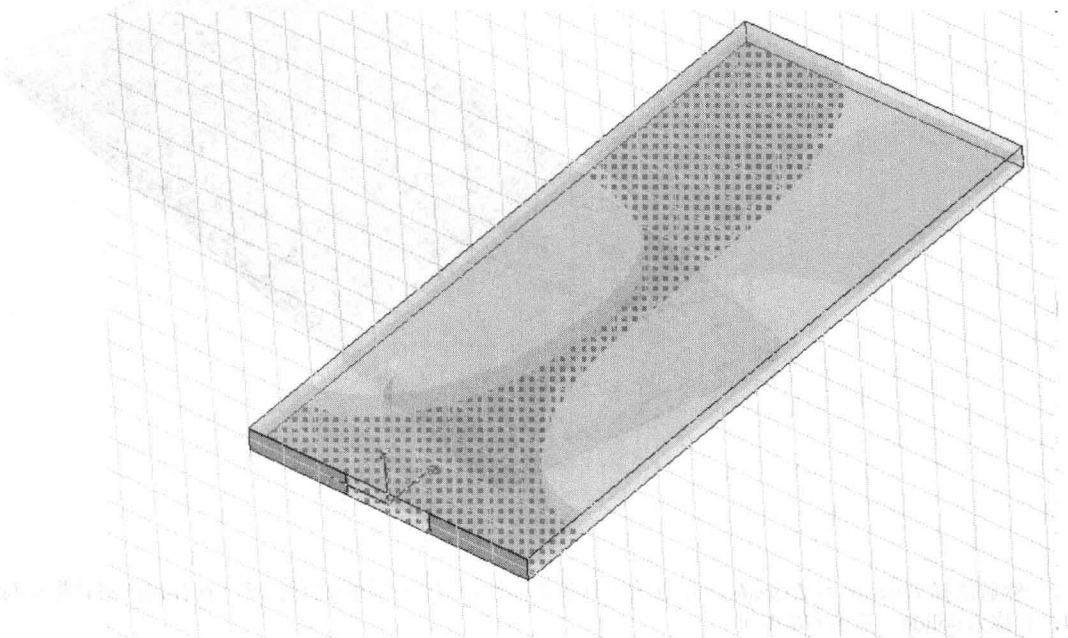
然后请您选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 ，对选中的面进行拉伸以增加金属片的厚度。在弹出的对话框中，请将 PEC 薄片的厚度 (*Height*) 设为 0.08，名称为 *solid1*，点击 *OK* 按钮。



接下来会弹出 *Shape Intersection* 对话框，提示为 *solid1* 与 *import_1* / *import_2* / *import_6* 的 Boolean 操作。请确定您依次选择了 *Insert highlighted shape* / *None* / *Insert highlighted shape*，分别点击 *OK* 按钮确认。



请您在导航树中选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *import_2*，点击右键，选中 *Delete* 将之删除。
同样地，请您用选面工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 选中模型的下面金属片 (*import_4*)。



然后请选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 ，对选中的面进行拉伸以增加下面金属片的厚度。在弹出的对话框中，设置 PEC 薄片的厚度 (*Height*) 为 0.08，名称为 *solid2*，点击 *OK* 按钮。

接下来会弹出 *Shape Intersection* 对话框，提示为 *solid2* 与 *import_4* 的 Boolean 操作。请选择 *None*，点击 *OK* 按钮。

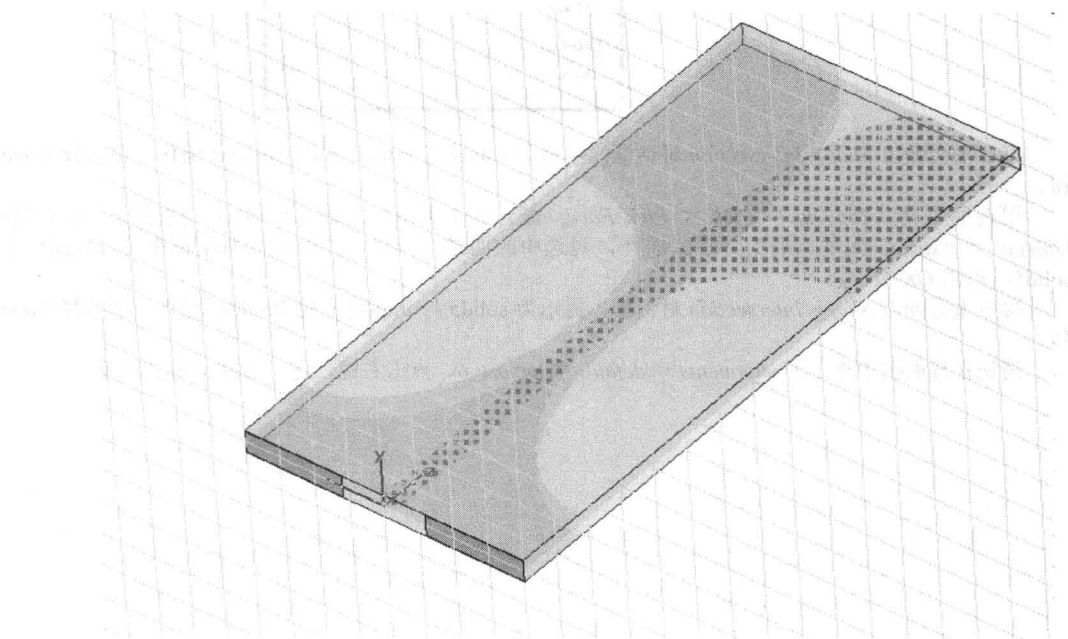
请您在导航树中选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *import_4*，点击右键，选中 *Delete* 将之删除。

对于中间的金片 (*import_3*)，也请您用选面工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 选中。

然后选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 ，对选中的面进行拉伸以增加中间金属片的厚度。在弹出的对话框中，设置 PEC 薄片的厚度 (*Height*) 为 0.08，名称为 *solid3*，点击 *OK* 按钮。

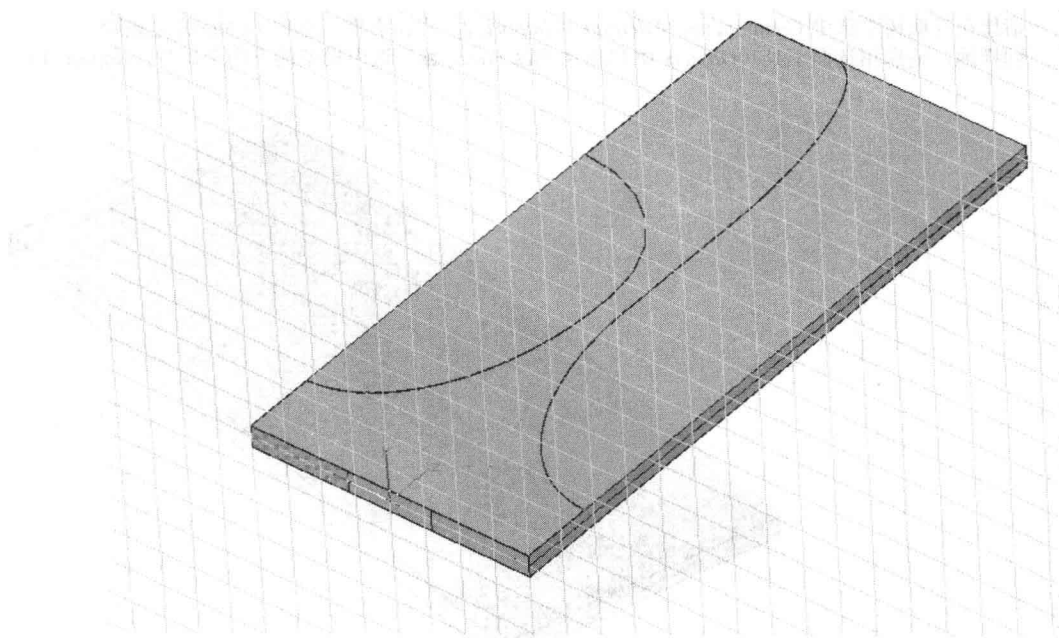
接下来会弹出 *Shape Intersection* 对话框，提示为 *solid2* 与 *import_3* / *import_5* 的 Boolean 操作。请依次选择 *None* / *Insert highlighted shape*，点击 *OK* 按钮。

请您在导航树中选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *import_3*，点击右键，选中 *Delete* 将之删除。

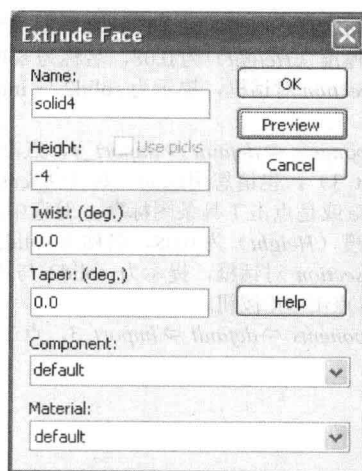


以上便完成了增加 PEC 薄片厚度的工作，接下来要修改馈电口。

请您用选面工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 选中如下图所示的端面。



然后选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 , 对选中的面进行拉伸。在弹出的对话框中将 *Height* 设为-4, 名称为 *solid4*, 点击 *OK* 按钮。

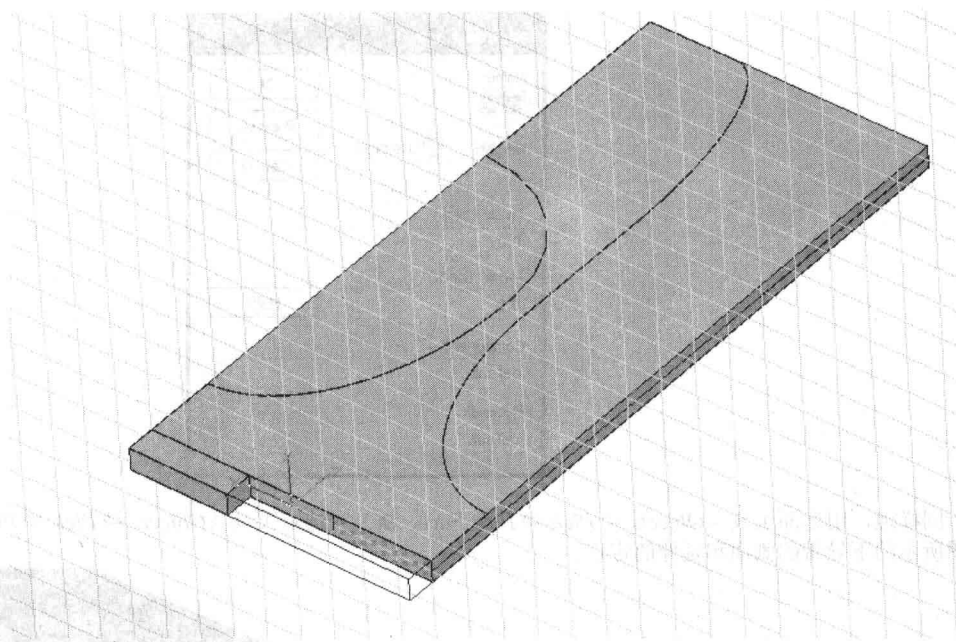


接下来会弹出 *Shape Intersection* 对话框, 提示为 *solid4* 与 *import_6* 的 Boolean 操作。请选择 *None*, 点击 *OK* 按钮。

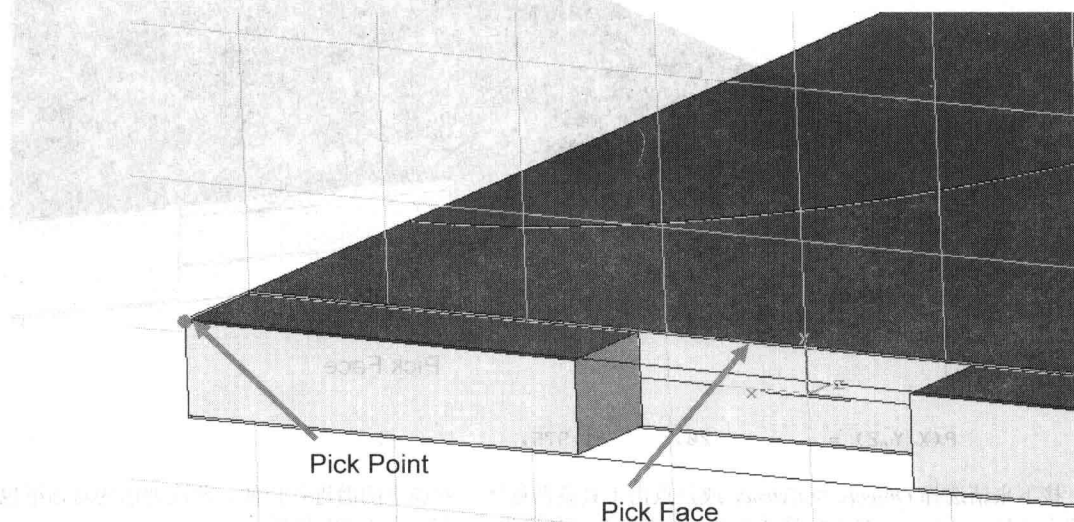
用选面工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 选中下图所示的另一端面。按照与上述类似的步骤, 选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 , 对选中的面进行拉伸。在弹出的对话框中将 *Height* 设为-4, 名称为 *solid5*, 点击 *OK* 按钮。

接下来会弹出 *Shape Intersection* 对话框, 提示为 *solid5* 与 *import_6* 的 Boolean 操作。请选择 *None*, 点击 *OK* 按钮。

请您在导航树中选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *import_6*, 点击右键, 选中 *Delete* 将之删除。

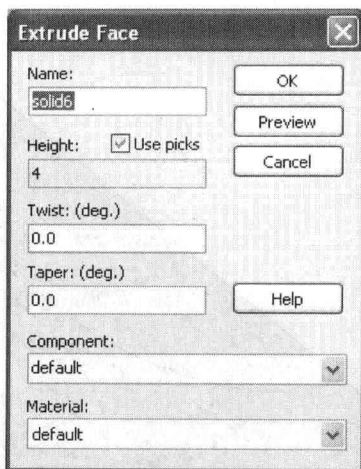


下面请分别用选面工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 和选点工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Point*, ) 选中如下图所示的上面金属片的侧面和延伸的定点。

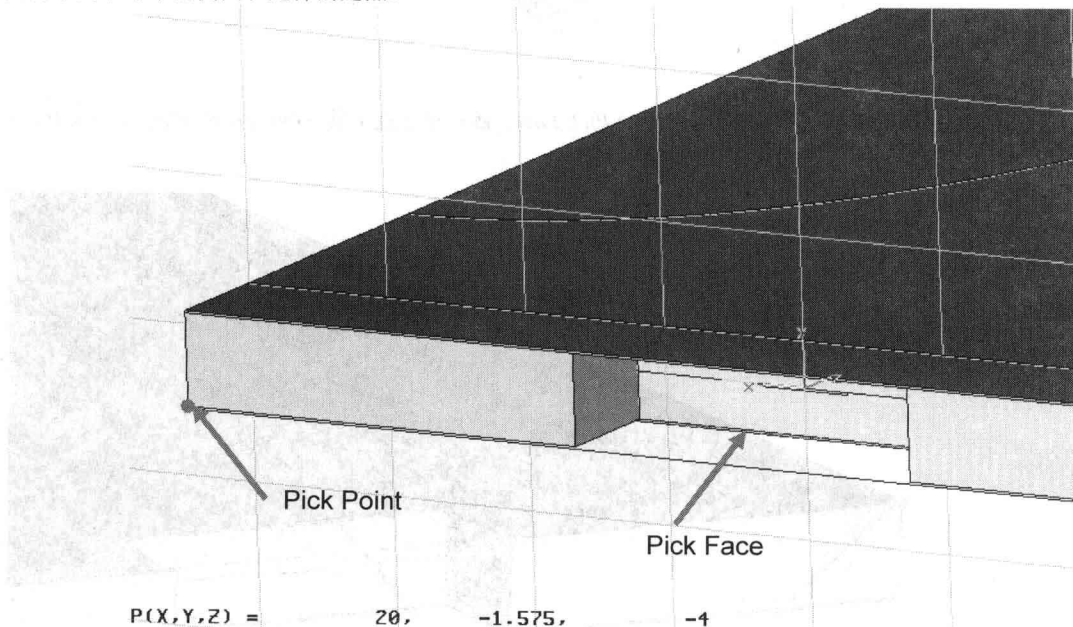


P(X,Y,Z) = 20, 1.495, -4

请选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 , 对选中的面进行拉伸。此次弹出的对话框与前面的不同, 由于此处使用了定点 (*Use picks*), *Height* 默认为 4, 无需更改, 名称为 *solid6*, 点击 *OK* 按钮。



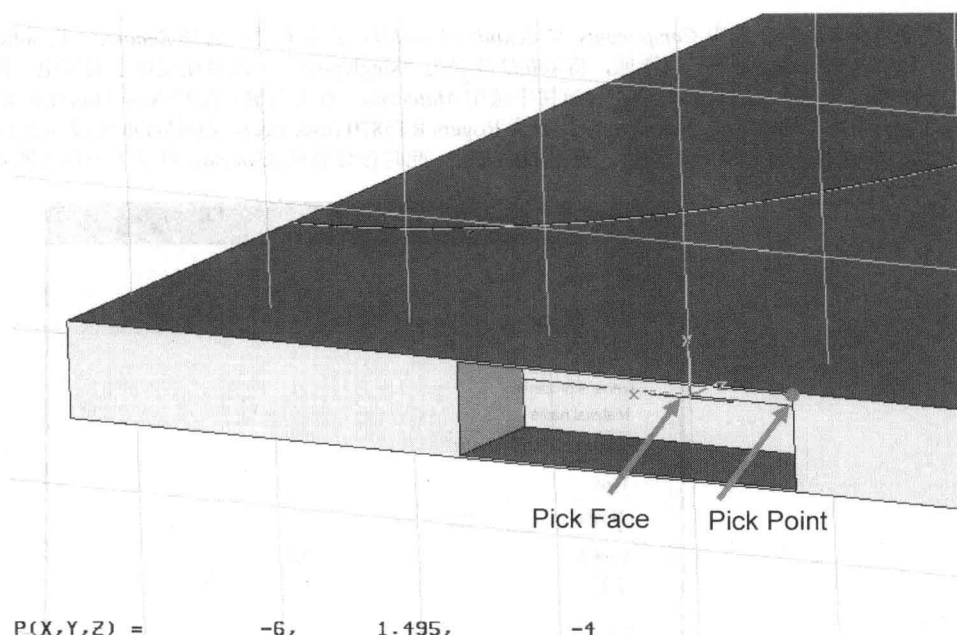
同样地，用选面工具（*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 和选点工具（*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Point*, ) 选中如下图所示的下导带的侧面和延伸的定点。



接下来请选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 , 对选中的面进行拉伸。此次弹出的对话框也由于使用了定点 (*Use picks*)，*Height* 默认为 4，无需更改，名称为 *solid7*，点击 *OK* 按钮。

请在导航树中选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *solid1*，然后激活 boolean 相加模式（*Objects* ⇒ *Boolean* ⇒ *Add*, ）。接下来请按住 *Ctrl* 键，同时选中 *solid2* / *solid4* / *solid5* / *solid6* / *solid7*，按 *Enter* 键确认将物体叠加为一个物体，名称为 *solid1*。

继续用选面工具（*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 和选点工具（*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Point*, ) 选中如下图所示的中间金属片的侧面和延伸的定点。



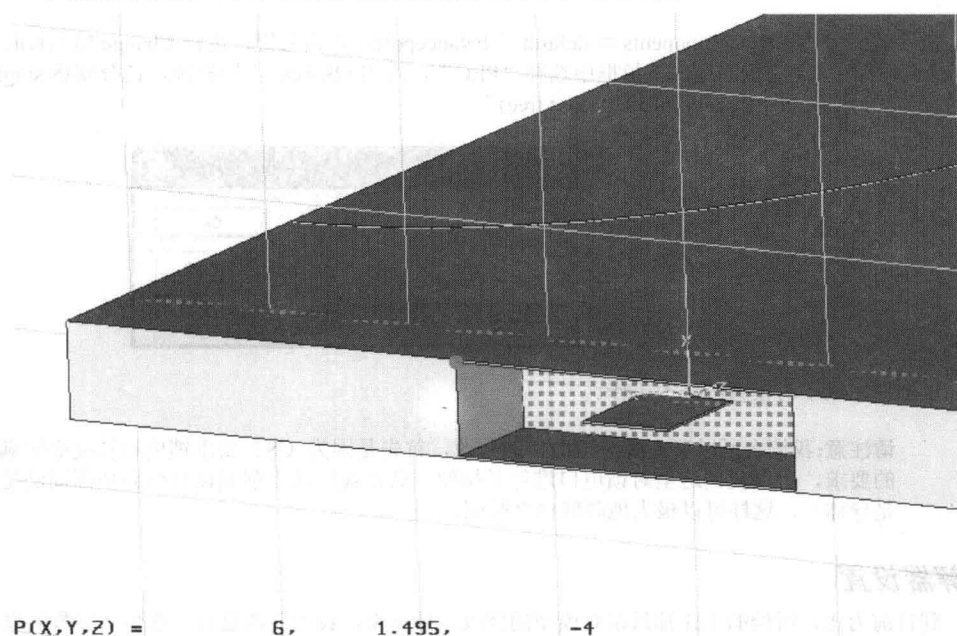
请选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 , 对选中的面进行拉伸。此次弹出的对话框中 *Height* 默认为 4, 无需更改, 名称为 *solid4*, 点击 *OK* 按钮。

请在导航树中选 *Components* ⇒ *default* ⇒ *solid3* 后, 激活 boolean 相加模式 (*Objects* ⇒ *Boolean* ⇒ *Add*, )。然后选中 *solid4*, 按 *Enter* 键确认将物体叠加为一个物体, 名称为 *solid3*。

请在导航树中选 *Components* ⇒ *default* ⇒ *import_1* 后, 激活 boolean 相加模式 (*Objects* ⇒ *Boolean* ⇒ *Add*, )。然后选中 *import_5*, 按 *Enter* 键确认将物体叠加为一个物体, 名称为 *import_1*。

接下来您可以在导航树中选 *Components* ⇒ *default* ⇒ *import_1*, 点击右键, 选择 *Rename*, 将 *import_1* 改为一个有意义的名字, 如: “*substrate*”。

用选面工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Face*, ) 和选点工具 (*Objects* ⇒ *Pick* ⇒ *Pick Point*, ) 选中如下图所示的介质板的侧面和延伸的定点。



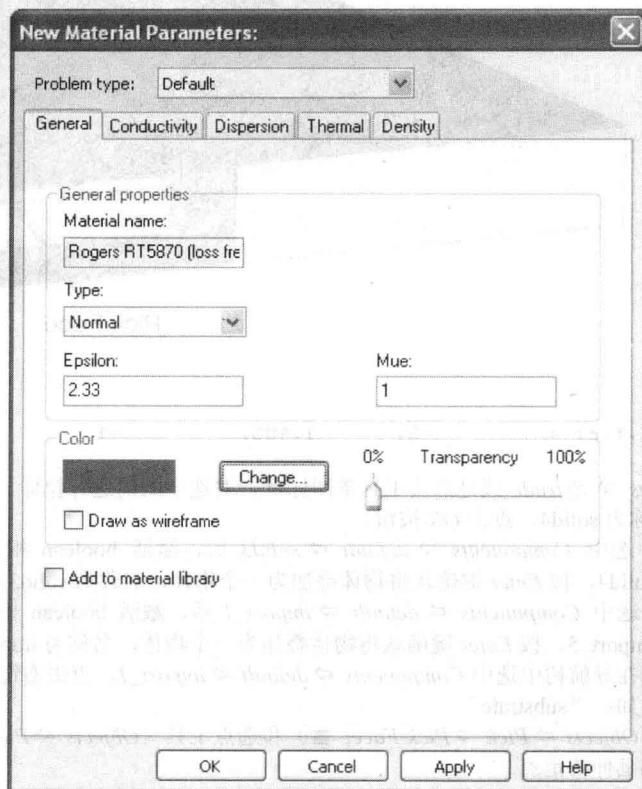
选择 *Objects* ⇒ *Extrude* 或是点击工具条图标 , 对选中的面进行拉伸。此次弹出的对话框 *Height* 默认为 4, 无需更改, 名称为 *solid8*, 点击 *OK* 按钮。

接下来会弹出 *Shape Intersection* 对话框, 提示为 *solid8* 与 *solid1* 的 Boolean 操作。请选择 *Trim highlighted shape*, 点击 *OK* 按钮。

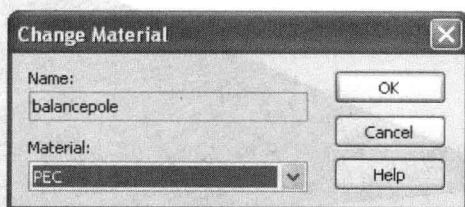
请在导航树中选 *Components* ⇒ *default* ⇒ *substrate* 后, 激活 boolean 相加模式 (*Objects* ⇒ *Boolean* ⇒ *Add*, )。然后选中 *solid8*, 按 *Enter* 键确认将物体叠加为一个物体, 名称为 *substrate*。

接下来在导航树中选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *solid1*，点击右键，选择 *Rename*，将 *solid1* 改为一个有意义的名字，如：“balancepole”。同样地，将 *solid2* 改名为“singlepole”。此时便完成了对馈电口的修改工作。

下面要定义介质板的材料。请在导航树中选中 *Materials*，点击右键，选择 *New Material* 来创建新的材料。在弹出的对话框中，请输入 *Material name*，此处为 *Rogers RT5870 (loss free)*，*Epsilon* 取值设为 2.33。可以在 *Color* 栏下点击 *Change* 选择一种您喜欢的颜色，点击 *OK* 按钮。此时在导航树 *Materials* 目录下出现了刚定义的材料。



在导航树中请选中 *Components* ⇒ *default* ⇒ *balancepole*，点击右键，选择 *Change Material*，弹出 *Change Material* 对话框，请在 *Material* 下拉框中选择“PEC”，点击 *OK* 按钮。同样地，请分别将 *singlepole* 和 *substrate* 的材料改为“PEC”和“Rogers RT5870 (loss free)”。



以上便完成了对模型的修改工作。

请注意:我们之所以要完成对馈电口的修改，首先是因为 CST 要求馈电口长度必须满足至少三个网格步长的要求，所以我们这里对馈电口进行了拉伸。其次我们这里强制馈电口介质四周满足电边界条件（四周均是导体），这样可以极大地降低仿真时间。

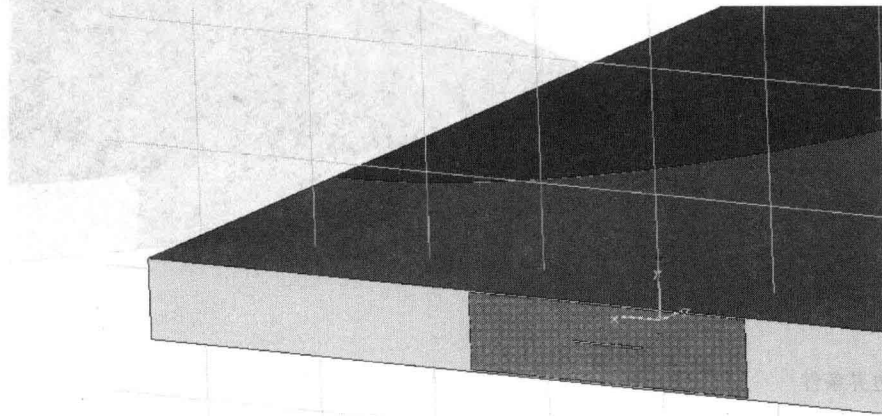
常用求解器设置

到目前为止，所做的工作都只是对模型的修改。接下来，我们还需进行一些仿真参数的设置。要计算 S 参量，得先定义端口。而且，需要指定仿真的边界条件、频率范围。此外为了优化计算，需要对模板的网格设置进行一些调整，同时为了得到所关心的场特性，需要定义相应的场监视器。

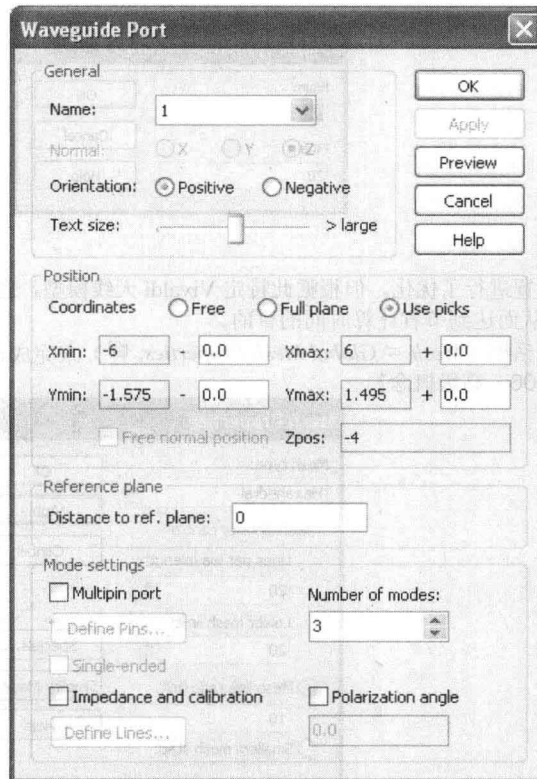
□ 定义端口

下一步是为天线添加激励端口，用于随后计算 S 参量和远场值。每个端口都模拟一段连接在端口面上的无限长的波导。

因波导端口能将结构无限延伸, 所以其横截面必须足够大, 要能够完全覆盖相应的模式。前面已对模型作了合适的修改, 端口面即是延伸出的介质 (“substrate”) 端面。因此, 定义端口的简单方法是选取延伸出的介质端面 (*Objects* $\Rightarrow$ *Pick* $\Rightarrow$ *Pick Face*, ) , 如图所示:



请打开波导端口定义对话框 (*Solve* $\Rightarrow$ *Waveguide Ports*, ) 来定义端口。这里需要您选择在此端口中应该被考虑的模式个数, 由于此处端口面积选取较大, 考虑到高次模的影响, 请将 *Number of modes* 设为 3。



所有设置无误后, 点击 *OK* 按钮创建该端口, 如下图所示。