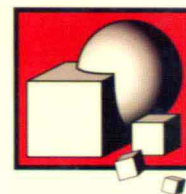
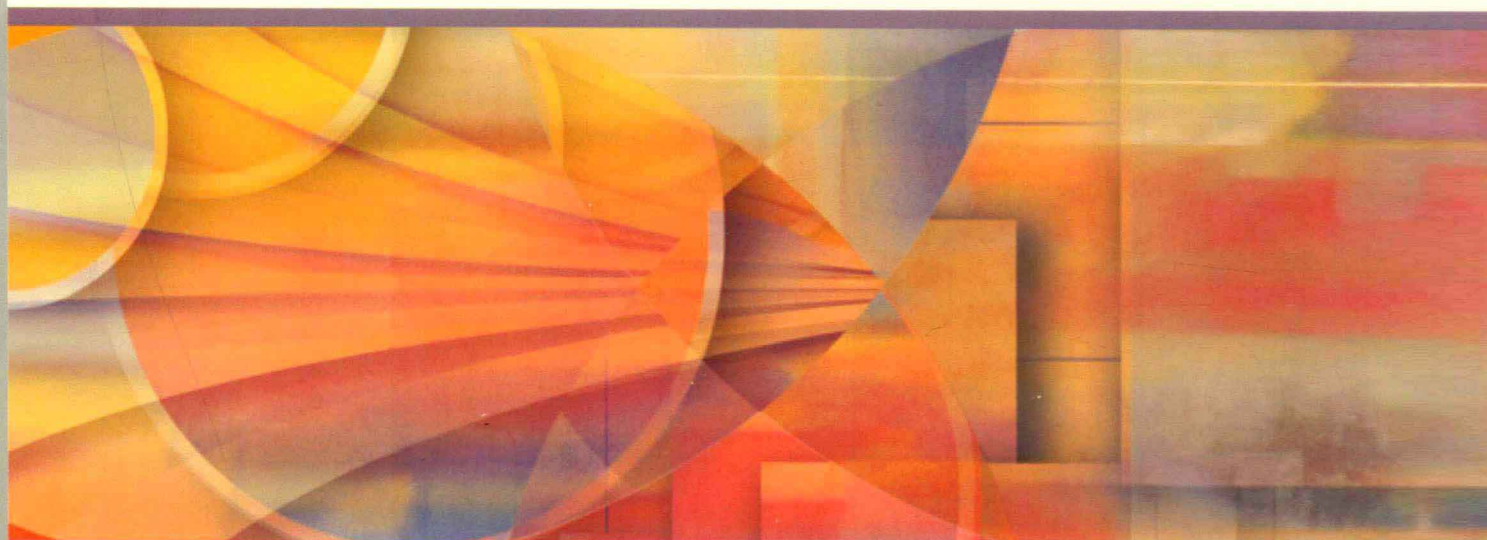


CST 工作室套装™ 丛书 2



CST 工作室套装™ 2006

高级概念



CST 微波工作室® | CST 电磁工作室™
CST 粒子工作室™ | CST 设计工作室™

CST China

目 录

第一章 概 述 3

第二章 仿真算法 4

2.1 仿真算法背景 4

 有限积分技术 (FIT) 4

 CST 微波工作室®求解器 6

 CST 电磁工作室™求解器 7

 CST 粒子工作室™求解器 8

 参考文献 8

2.2 误差来源 9

 仿真模型与真实模型间的差异 9

 仿真引入的误差 9

第三章 网格生成 10

3.1 六面体网格生成方法 10

3.2 高频问题的六面体网格生成 10

3.3 高频问题的自适应六面体网格生成 14

3.4 低频问题的六面体网格生成 17

3.5 低频问题的自适应六面体网格生成 20

3.6 四面体网格生成 22

3.7 起始六面体网格离散化介绍 26

 同轴结构 27

 平面结构 27

 螺旋结构 28

3.8 网格调整 28

 六面体网格生成的局部网格参数 28

 四面体网格生成的局部网格参数 31

第四章 计算性能改进 34

4.1 通用小技巧 34

4.2 高频时域仿真 34

 非谐振结构 36

 谐振结构 36

4.3 自回溯滤波器 (AR-Filter) 37

4.4 使用四面体网格划分薄导体 42

第五章 CAD 导入及修补..... 43

5.1 导入 2D 文件..... 43

5.2 导入 3D 文件..... 44

5.3 检查并修复导入的模型..... 45

5.4 导入模型的参量化..... 50

第六章 后处理模板..... 52

6.1 控制结果模板的框架..... 52

6.2 程序自带后处理模板..... 53

后处理模板的例子..... 53

第七章 VBA 宏语言..... 57

7.1 概述..... 57

7.2 VBA 开发环境..... 57

VBA 帮助系统..... 57

VBA 编辑器中可用快捷键..... 57

7.3 VBA 语言元素..... 58

子程序和函数..... 58

变量、数据类型和类型转换..... 59

应用程序、对象及其方法..... 60

控制流..... 61

文件操作..... 61

VBA 用户界面编辑器..... 62

数学函数、操作符和常量..... 62

7.4 CST 工作室套装™中的宏编程概念..... 63

用户定义函数..... 63

局部项目宏..... 63

全局宏以及全局库路径..... 63

7.5 控制宏..... 64

Result1D 对象..... 64

Result3D 对象..... 66

向导航树中添加数据项..... 67

查询文件夹并从导航树中选择相应的项..... 67

访问当前显示的绘图数据..... 68

从 VBA 脚本中访问远场数据..... 68

7.6 几何建模宏..... 69

创建几何建模宏和新的项目模板..... 69

创建几何建模宏的难点..... 71

在几何建模宏中使用对话框..... 71

几何建模宏使用中的注意事项..... 71

7.7 软件自带的 VBA 宏..... 72

目 录

第一章 概 述	3
第二章 仿真算法	4
2.1 仿真算法背景	4
有限积分技术 (FIT)	4
CST 微波工作室®求解器	6
CST 电磁工作室™求解器	7
CST 粒子工作室™求解器	8
参考文献	8
2.2 误差来源	9
仿真模型与真实模型间的差异	9
仿真引入的误差	9
第三章 网格生成	10
3.1 六面体网格生成方法	10
3.2 高频问题的六面体网格生成	10
3.3 高频问题的自适应六面体网格生成	14
3.4 低频问题的六面体网格生成	17
3.5 低频问题的自适应六面体网格生成	20
3.6 四面体网格生成	22
3.7 起始六面体网格离散化介绍	26
同轴结构	27
平面结构	27
螺旋结构	28
3.8 网格调整	28
六面体网格生成的局部网格参数	28
四面体网格生成的局部网格参数	31
第四章 计算性能改进	34
4.1 通用小技巧	34
4.2 高频时域仿真	34
非谐振结构	36
谐振结构	36
4.3 自回溯滤波器 (AR-Filter)	37
4.4 使用四面体网格划分薄导体	42

第五章 CAD 导入及修补..... 43

5.1 导入 2D 文件..... 43

5.2 导入 3D 文件..... 44

5.3 检查并修复导入的模型..... 45

5.4 导入模型的参量化..... 50

第六章 后处理模板..... 52

6.1 控制结果模板的框架..... 52

6.2 程序自带后处理模板..... 53

后处理模板的例子..... 53

第七章 VBA 宏语言..... 57

7.1 概述..... 57

7.2 VBA 开发环境..... 57

VBA 帮助系统..... 57

VBA 编辑器中可用快捷键..... 57

7.3 VBA 语言元素..... 58

子程序和函数..... 58

变量、数据类型和类型转换..... 59

应用程序、对象及其方法..... 60

控制流..... 61

文件操作..... 61

VBA 用户界面编辑器..... 62

数学函数、操作符和常量..... 62

7.4 CST 工作室套装™中的宏编程概念..... 63

用户定义函数..... 63

局部项目宏..... 63

全局宏以及全局库路径..... 63

7.5 控制宏..... 64

Result1D 对象..... 64

Result3D 对象..... 66

向导航树中添加数据项..... 67

查询文件夹并从导航树中选择相应的项..... 67

访问当前显示的绘图数据..... 68

从 VBA 脚本中访问远场数据..... 68

7.6 几何建模宏..... 69

创建几何建模宏和新的项目模板..... 69

创建几何建模宏的难点..... 71

在几何建模宏中使用对话框..... 71

几何建模宏使用中的注意事项..... 71

7.7 软件自带的 VBA 宏..... 72

第一章 概 述

本书专为那些已经熟练掌握 CST 工作室套装™ 的基本使用概念的高级用户设计。

在您开始阅读本书之前，我们强烈建议您仔细通读《CST 基础入门》和《应用算例》。

《高级概念》提供了一些更加相关的主题的附加信息，下面列出了本书的主要内容：

- 第二章主要介绍基本的数字仿真技术—有限积分法（FI）。介绍完该方法的基本原理后，我们将一起了解一些 PBA® 技术（理想边界拟合，Perfect Boundary Approximation）。本章的最后部分将介绍所有可能的误差来源。
- 第三章的主要内容是网格生成策略，包括四面体网格和六面体网格。
- 第四章着眼于讲述一些有助于提高仿真性能的技术。
- 第五章涵盖了导入二维和三维 CAD 数据的所有基本原理。并提供一些小技巧，以便改进 CAD 数据文件导入的稳定性和可靠性。
- 第六章讨论了后处理模板，以及如何使用后处理模板来自动进行后处理。
- 第七章我们将学习 CST 工作室套装™ 中使用的以 VBA 为基础的宏编程的关键概念。通过几个例子您就可以了解到有关最重要的 VBA 元素的信息。对这些语言元素的基本了解将有助于您编写自己的宏和用户自定义函数。

由于篇幅的限制，故本书无法涵盖所有的高级概念。要很好地掌握这些更高级的概念，我们强烈建议您参加 CST 为您提供的各类专业培训。请与我们联系以获取更多信息。

第二章 仿真算法

2.1 仿真算法背景

有限积分技术 (FIT)

CST 工作室套装™ 是以有限积分技术[1]为基础的通用电磁场仿真软件，于 1976 至 1977 年间，由 Weiland 教授首先提出。该数值方法提供了一种通用的空间离散化方案，可用于解决各种电磁场问题，从静态场计算到时域和频域的高频应用。下面的章节中介绍了本方法的主要内容，并根据不同的求解器介绍具体的实现形式。

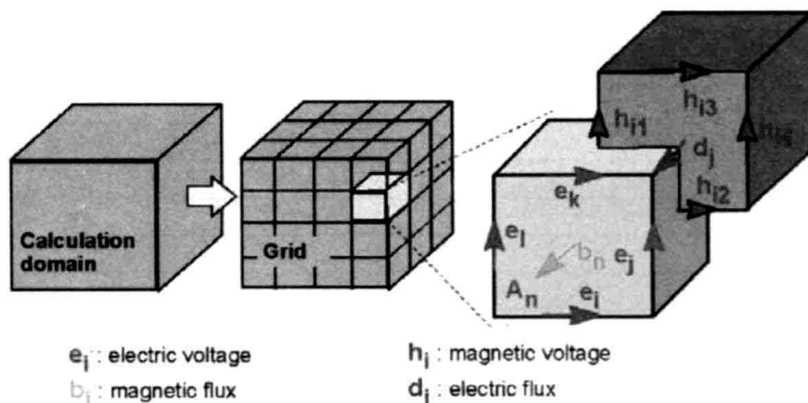
与其他的许多数值方法不同，FIT 将下列积分 (integral) 形式的麦克斯韦方程离散化，而不是离散化微分形式的麦氏方程：

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}, \quad \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{A},$$

$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho dV, \quad \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0.$$

采用数值方法求解这些方程，您需要定义一个有限的计算区域，该区域包含了整个的计算问题。生成一套网格，将计算区域分割为许多小的网格单元。为简捷起见，下面我们仅讨论正交六面体网格。

此类网格系统包含两套相互嵌套、相互正交的网格：基网格 (Primary/Base Grid) 和伴随网格 (Secondary/Dual Grid)。在 CST 工作室套装™ 的网格视图 (Mesh View) 看到的是基网格。对麦克斯韦方程的空间离散最终由这两套正交的网格系完成。参照下图可以看到，在基网格 $\mathbf{G}$ 的棱边上定义了电压 $\mathbf{e}$ ，在基网格的面上定义了磁通 $\mathbf{b}$ ；相应地，在伴随网格 $\tilde{\mathbf{G}}$ 的棱边上定义了磁压 $\mathbf{h}$ ，在伴随网格的面上定义了电通 $\mathbf{d}$ ：



如下图示，麦克斯韦方程将在每个网格面上进行离散。如法拉第电磁感应定律，其等式左边的回路积分可以表示为四个基网格棱边电压之和。其等式的右边可以用前面四个棱边所包含的基网格面磁通的时间偏导来表示。值得一提的是，此操作并没有引入任何的近似。将以上离散过程应用于所有的基网格面，并将此写成矩阵形式，同时定义一个与解析旋度算子相对应的矩阵 $\mathbf{C}$ ，便可得到下面所示的矩阵形式的法拉第电磁感应定律。矩阵 $\mathbf{C}$ 称之为离散旋度算子，该算子的拓扑结构只与结构和边界相关，其元素只包含 0、1、-1。

$$\oint_{\partial A_n} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_{A_n} \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \hat{=} \quad \mathbf{C}\mathbf{e} = - \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{b}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{bmatrix} = - \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}$$

采用上述的离散方法，把安培环路定律在伴随网格上进行离散，便可得到相应的伴随离散旋度算子 $\tilde{\mathbf{C}}$ 。我们采用同样的方法将剩余的两个散度方程离散化，将得到分别作用于基网格和伴随网格的两个离散散度算子 $\mathbf{S}$ 和 $\tilde{\mathbf{S}}$ 。正如前面所述，这些离散散度、旋度算子仅含有元素 0、1、-1，代表了结构的拓扑信息。最终，我们得到完全离散化的麦克斯韦网格方程（Maxwell's Grid Equations (MGEs)）：

$$\begin{aligned} \mathbf{C}\mathbf{e} &= -\frac{d}{dt}\mathbf{b}, & \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} &= \frac{d}{dt}\mathbf{d} + \mathbf{j}, \\ \tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} &= \mathbf{q}, & \mathbf{S}\mathbf{b} &= \mathbf{0}. \end{aligned}$$

与解析形式的麦克斯韦方程组相比，可以很容易地发现这两种表述方式非常相似。这里再次强调，离散化的过程中，并没有引入任何近似。与其他各类计算电磁学算法相比，有限积分法（FIT）有一个独特的特性：解析形式下的梯度、旋度和散度算子的如下特性在网格空间中完全保持不变。即：旋度的散度恒等于零；梯度的旋度恒等于零。

$$\begin{aligned} \mathbf{S}\mathbf{C} = \tilde{\mathbf{S}}\tilde{\mathbf{C}} &= \mathbf{0} & \Leftrightarrow & \quad \text{div rot} \equiv 0 \\ \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{S}^T = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{S}^T &= \mathbf{0} & \Leftrightarrow & \quad \text{rot grad} \equiv 0 \end{aligned}$$

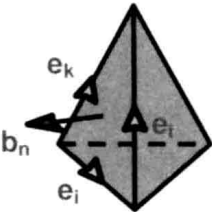
需要说明的是，对某种数值算法的空间离散会导致迭代的不稳定。然而，基于前面介绍的基本原理，我们可以看出有限积分技术并不受这一问题的影响，因为离散麦克斯韦网格方程组（MGEs）自身能保持能量和电荷的守恒[2]。

最后，由于空间的离散化，介质方程将引入不可避免的数值误差。在定义电压和磁通之间的关系时，它们的积分值必须在网格棱边和网格面上分别拟合。因此，最后得到的矩阵元的值不仅取决于均一化的材料参数还取决于网格的分辨率，三个介质方程如下所示。

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} & \mathbf{d} &= \mathbf{M}_\epsilon \mathbf{e} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} & \mathbf{b} &= \mathbf{M}_\mu \mathbf{h} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} + \vec{J}_s & \mathbf{j} &= \mathbf{M}_\sigma \mathbf{e} + \mathbf{j}_s \end{aligned}$$

此时，所有四个解析主导方程和三个介质方程都已经被离散化，因此我们可以在离散网格空间中求解任意的电磁场问题。解析算子被一一映照到离散算子，并且离散算子拥有解析算子的所有恒等式特性，对本数值算法来说，这些特性有着重要的理论、数值和算法意义[2]。

除了正交六面体网格，有限积分技术还可以用于更通用的网格类型，如不规则拓扑网格（子网）以及四面体网格。下图所示为四面体网格上的电压和磁通分布。



将有限积分技术应用于更通用的网格可以作为上面提到的基本方法的扩展。由于本书的篇幅有限，这里不再详细叙述这些高级技术。请参考参考文献[4]以获取更多信息。

对于直角坐标系网格，有限积分算法的时域形式就是标准的时域有限差分方法（FDTD）。然而，经典的FDTD算法只限于阶梯网格近似（Staircase Mesh）。相反，有限积分算法中使用的理想边界拟合®（PBA）技术保持了结构化直角坐标系网格的所有优点，并且可以对曲线结构进行精确建模。使用薄片技术™（TST）可以进一步提高有限积分法的性能，该技术改进了对理想导体片的建模。

正如上面介绍的，有限积分法是一种通用的算法，覆盖直流、简谐、瞬态、带电粒子等所有的电磁问题中。

CST 工作室套装™ 的一个显著优点是基于需求的网格（Mesh on Demand™）策略，该策略是对六面体网格（包含 PBA®和 TST™）和四面体网格的组合。这一灵活性使得您可以为不同的应用算例选择最合适的网格类型。与基于需求的求解（Method on Demand™）功能相结合，使得基于需求的网格（Mesh on Demand™）功能更加强大，因为基于需求的求解（Method on Demand™）功能使得您可以为给定的问题选择最有效的求解器模块。

当前，CST 工作室套装™ 中有三个可用的子软件可用于求解电磁场问题。

1. **CST 微波工作室® (MWS)**，高频应用领域最快、最准的仿真工具，其应用领域包括：天线、滤波器、耦合器、平面和多层结构、RCS、EMS、EMI 等。CST 微波工作室可计算任意结构任意材料的物体，其包含时域、频域和本征模三个求解器，同时包含两套网格：六面体网格和四面体网格。
2. **CST 电磁工作室™ (EMS)**，主要处理静电、静磁、稳恒电流、低频电磁场和稳态温度场的分析和设计，主要应用于：传感器、驱动装置、变压器、测试仪器、电磁屏蔽和欧姆热损耗分析。

3. **CST 粒子工作室™ (PS)**, 粒子跟踪求解器软件包, 主要应用于: 电子枪、行波管、速调管、磁控管、聚焦线圈、磁束缚、粒子加速器等自由带电粒子与电磁场的自恰相互作用的仿真分析。

CST 微波工作室®求解器

三种求解器可用于求解高频电磁场问题: 时域、频域和本征模求解器。请参考《CST 微波工作室®基础入门》获取有关这些求解器的详细信息。下面的章节中, 我们将着眼于介绍这些求解器的基本信息以及相应的离散麦克斯韦网格方程。

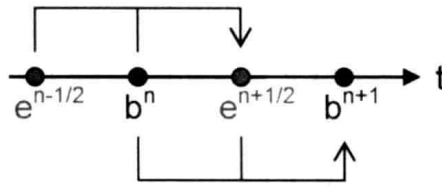
□ 时域求解器

CST 微波工作室®的时域求解器只需运行一次即可得到结构的宽带特性。因此, 对大多数带有激励源的问题, 以及开域问题和电大问题都非常有效。请参考本书的 4.2 节, 以获取有关如何提高求解器性能的详细信息。

时域求解器以离散麦克斯韦网格方程组 (*Maxwell's Grid Equations*) 为基础。用中心差分代替时间导数, 生成显式方程, 以下为无耗情况下的时间积分方程。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^{n+1/2} &= \mathbf{e}^{n-1/2} + \Delta t \mathbf{M}_\epsilon^{-1} [\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{M}_\mu^{-1} \mathbf{b}^n + \mathbf{j}_s^n] \\ \mathbf{b}^{n+1} &= \mathbf{b}^n - \Delta t \mathbf{C} \mathbf{e}^{n+1/2} \end{aligned}$$

对于上面的方程, 计算变量是电压和磁通。这两个量在时间轴上交替出现。如下面所示的著名的蛙跳 (leap-frog) 过程:



例如, $t = (n+1)\Delta t$ 时刻的磁通是由上一步 ($t = n\Delta t$) 的磁通和上半步 ($t = (n+1/2)\Delta t$) 的电压计算所得。

显式表示的时间积分过程的稳定性是有条件的, 其稳定条件由下式给定。本式给出了时间步长 (Δt) 与网格步长 (Δx , Δy , Δz) 之间的关系, 这就是著名的 Courant-Friedrichs-Levy (CFL) 稳定性条件。

$$\Delta t \leq \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}}$$

每个网格单元的计算都应该满足该稳定性条件。

□ 频域求解器

CST 微波工作室®的频域求解器主要用于仿真电小至电中的问题以及窄带结构。该求解器的其他应用领域是具有任意周期性边界甚至是元胞 (unit cell) 边界的物体。

频域求解器以简谐 ($\partial/\partial t \rightarrow i\omega$) 麦克斯韦网格方程为基础。对于无耗问题, 我们有如下所示二阶方程:

$$(\text{curl} \mu^{-1} \text{curl} - \omega^2 \epsilon) \vec{E} = -i\omega \vec{J} \Rightarrow (\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{M}_\mu^{-1} \mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M}_\epsilon) \mathbf{e} = -i\omega \mathbf{j}$$

通用频域求解器既可以采用四面体网格也可以采用六面体网格。

除了通用频域求解器, 还含有一个专门用于计算高谐振无耗结构 (如: 滤波器) S 参量的求解器模块。该求解器并不计算场值, 但是比其他的仿真方法要快得多。作为第二个求解器的扩展的第三个可选用的求解器, 还可以用来计算场值。当然, 附加的场值计算耗费了很多时间, 在一定程度上降低了求解器性能。

□ 本征模求解器

CST 微波工作室®的本征模求解器可以用来计算结构的本征模以及相应的本征值。

本征模求解器基于亥姆霍兹 (Helmholtz) 本征方程, 求解无源和无耗时谐问题。通过克雷洛夫子空间 (Krylov-Subspace) 或是雅可比-戴维森 (Jacobi-Davidson) 方法来获得无耗问题的解。

$$\text{curl} \mu^{-1} \text{curl} \vec{E} = \omega^2 \epsilon \vec{E} \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{M}_{\mu^{-1}} \mathbf{C} \mathbf{e} = \omega^2 \mathbf{M}_{\epsilon} \mathbf{e}.$$

对于有耗问题，可以选用雅可比-戴维森（Jacobi-Davidson）求解器。

CST 电磁工作室™ 求解器

CST 电磁工作室™共有五类不同的求解器：静电求解器、稳恒电流求解器、静磁求解器、低频频域求解器以及稳态热求解器。请参考《CST 电磁工作室™基础入门》以获取有关这些求解器的详细信息。本节主要介绍这些求解器采用的离散麦克斯韦网格方程。

□ 静电求解器

以静场（ $\partial/\partial t = 0$ ）的离散法拉第定律以及相应的散度方程为基础，建立求解静电问题的线性方程组：

$$\text{div} \epsilon \text{grad} \phi = -\rho \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{M}_{\epsilon} \tilde{\mathbf{S}}^T \boldsymbol{\phi}_{\epsilon} = \mathbf{q}$$

该求解器模块既可以采用六面体网格也可以采用四面体网格。

□ 稳恒电流求解器

以静场（ $\partial/\partial t = 0$ ）的离散安培定律以及相应的散度方程为基础，建立求解稳恒电流问题的线性方程组：

$$\text{div} \kappa \text{grad} \phi = 0 \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{M}_{\kappa} \tilde{\mathbf{S}}^T \boldsymbol{\phi}_j = \mathbf{0}$$

□ 静磁求解器

要求解静磁场问题，第一步是要建立一个满足安培定律但却没有物理意义的矢量场 $\mathbf{h}_i$ ：

$$\text{rot} \vec{H}_i = \vec{J} \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{C}} \mathbf{h}_i = \mathbf{j}$$

一般说来，该场中含有磁荷，但是只需求解一个标量场即可排除这些磁荷：

$$\begin{aligned} \text{div} \mu \vec{H}_i &= \rho_m \quad \Rightarrow \quad \mathbf{S} \mathbf{M}_{\mu} \mathbf{h}_i = \mathbf{q}_m \\ \text{div} \mu \text{grad} \phi &= -\rho_m \quad \Rightarrow \quad \mathbf{S} \mathbf{M}_{\mu} \mathbf{S}^T \boldsymbol{\phi}_m = \mathbf{q}_m \end{aligned}$$

最终，通过矢量场 $\mathbf{h}_i$ 和标量位，并利用下列方程，即可获得真实的磁场矢量值：

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_i - \mathbf{S}^T \boldsymbol{\phi}_m$$

该求解器模块既可以采用六面体网格也可以采用四面体网格。

□ 低频频域求解器

低频频域求解器以简谐（ $\partial/\partial t \rightarrow i\omega$ ）麦克斯韦网格方程为基础，生成以下二阶方程：

$$(\text{curl} \mu^{-1} \text{curl} - \omega^2 \epsilon + i\omega \sigma) \vec{E} = -i\omega \vec{J} \quad \Rightarrow \quad (\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{M}_{\mu^{-1}} \mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M}_{\epsilon} + i\omega \mathbf{M}_{\sigma}) \mathbf{e} = -i\omega \mathbf{j}.$$

该求解器模块既可以采用六面体网格也可以采用四面体网格。

□ 稳态热求解器

以静场（ $\partial/\partial t = 0$ ）的离散傅立叶热传导定律以及相应的散度方程为基础，建立热问题的线性方程组：

$$\text{div} k \text{grad} T = -\dot{Q} \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{M}_k \tilde{\mathbf{S}}^T T = \dot{Q}$$

CST 粒子工作室™ 求解器

CST 粒子工作室™中含有一些前面已经介绍过的求解器模块：

- ☐ 静电求解器
- ☐ 静磁求解器
- ☐ 本征模求解器

除了以上几个求解器模块外，CST 粒子工作室™ 还包含有一些特殊的求解器，下面只介绍这些特殊的求解器。注意，当前 CST 粒子工作室™中只可以采用六面体网格。

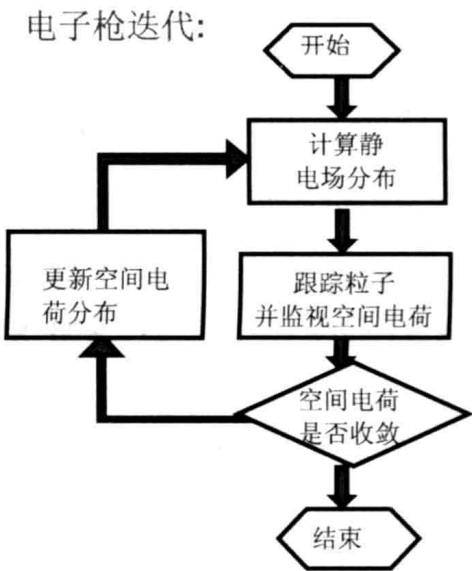
☐ 粒子跟踪求解器

CST 粒子工作室™的粒子跟踪求解器用于计算电磁场对带电粒子运动的作用。
该求解器以离散形式的洛伦兹力定律为基础：

$$m \frac{dv}{dt} = q(\vec{E} + \mathbf{v} \times \vec{B}), \Leftrightarrow m^{n+1} \mathbf{v}^{n+1} = m^n \mathbf{v}^n + \Delta t (\vec{E}^{n+1/2} + \mathbf{v}^{n+1/2} \times \vec{B}^{n+1/2}), \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \Leftrightarrow \vec{r}^{n+3/2} = \vec{r}^{n+1/2} + \Delta t \vec{v}^{n+1}.$$

☐ 电子枪迭代求解器

电子枪迭代求解器中交替进行空间电荷作用的电磁场计算和粒子跟踪计算。首先，以先前运行的粒子跟踪为基础，计算由粒子引起的相应的空间电荷场。然后，计算由空间电荷产生的电场，并应用于下一次粒子跟踪迭代。系统将不断地迭代计算直到结果收敛。下面是该原理的流程图：



参考文献

[1] Weiland, T.: A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields: Electronics and Communication, (AEÜ), Vol. 31, pp. 116-120, 1977.

[2] Weiland, T.: Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. International Journal of Numerical Modelling, Vol. 9, pp. 295-319, 1996.

[3] Krietenstein, B.; Schuhmann, R.; Thoma, P.; Weiland, T.: The Perfect Boundary Approximation technique facing the challenge of high precision field computation: Proc. of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC'98), Chicago, USA, pp. 860-862, 1998.

[4] T. Weiland: RF & Microwave Simulators - From Component to System Design Proceedings of the European Microwave Week (EUMW 2003), München, Oktober 2003, Vol. 2, pp. 591 - 596.

2.2 误差来源

每种离散的数值方法都带有各种误差，这些误差可能是计算模型与真实设备不一致造成的结构误差，也可能是计算数值误差。本节将概括介绍最重要的误差来源。在实际算例中，很多这样的误差都可以忽略不计，但是要确保结果的可靠性，您必须清楚地知道这些误差的存在。

仿真模型与真实模型间的差异

- 几何尺寸 (**Geometric dimensions**) 可能有错误，或是结构中的细节部位被忽略了。这种情况经常发生，而且只能通过将所画模型与真实结构进行仔细对照来避免。采用相同的方法对含有细节部位的模型和不含细节部位的模型分别进行仿真可用来分析细小结构的影响。
- 材料参数 (**Material parameters**) 可能有错误，这也许是因为对材料参数不够了解，也许是因为使用的值对其他频带有效，而在研究的频带上该值无效。尤其是研究宽带设备时，输入正确的材料色散特性是非常有必要的。例如，对于有些介质材料来说，选用固定的损耗正切 ($\tan \delta$) 将比固定的电导率更合适。
- 选用的激励源 (**source of excitation**) 可能有误，如：用理想匹配微带线端口代替同轴线对具有归一化阻抗的微带线进行馈电。而且，对于开放端口，如微带线和共面线，选用的端口应该足够大以便正确捕获传播模式的场图。请记住，即使离散端口与波导端口有相同的阻抗，它们也不是理想匹配的。
- 对于输出端口 (**output ports**) 也有同样的考虑，您应该创建一个与测量结构完全吻合的仿真模型。
- 有时候，对环境 (**environment**) 的考虑有误。需要测量的结构附近的物体会对结果产生影响，此时，应将这些物体包含在仿真模型中。

仿真引入的误差

- 离散化误差 (**Discretization error**)：要确保结果的精确度，必须在空间中对电磁场进行足够多的采样。一般说来，网格越密，场值的结果越精确，采用有限积分 (FI) 法可以确保获得收敛的结果。CST 工作室套装™ 通过网格密度参数的自适应以及对收敛过程的查看来完成收敛性分析 (参见 3.3 和 3.5 节)。
- 截断误差 (**Truncation error**)：如果时域计算在时域信号衰减到零之前停止，就会引入截断误差 (“truncation error”)。我们将在 4.2 和 4.3 节对该主题进行详细地讨论。
- 几何误差 (**geometry error**) 是 CAD 结构与网格模型之间的差异。一些基于正交网格的方法在仿真之前，将圆形结构转变为阶梯状模型。在四面体网格中，用分段平直表面来逼近物体结构 (见 3.6 节)。对于融合了 PBA 技术 (理想边界拟合™) 的六面体网格，几何误差变得很小，甚至可以忽略，尤其是对于光滑导体。但是，当物体的尺寸比网格还要小时，几何误差是不可以忽略的。
- 有些误差是由不够理想的边界条件 (**boundary conditions**) 引起的。对于辐射结构，其开放空间是由开放边界模拟的。对于高频问题，即使结构与物体靠得很近，采用 PML 技术 (完美匹配层) 也很合适而且很精确。CST 工作室套装™ 将自动选择最佳尺寸的边界仿真盒子，但是偶尔检查一下盒子的改变对结果的影响也是值得的。
- 波导端口 (**Waveguide ports**) 拥有特定的开放边界技术，可以将波分解到它们的模式图中。该技术比上面介绍的 PML 边界条件的精度要高。对于宽频带的非均匀端口如微带线，采用特殊的处理方法使得误差低于 -50 或 -60 dB 是很有必要。正如前面介绍的，波导端口的尺寸必须定义的足够大。
- 即使正确地算得了场值，插值误差 (**interpolation errors**) 也仍有可能存在，如：获取导出场量以及计算非网格边缘位置的场值时都可能引入插值误差。
- 有限字长可能会引入数字误差 (**Numerical errors**)，但是在时域显式算法中可以忽略该误差。然而，除了时域求解器，求解相应的矩阵时都可能引入数字误差。

鉴于这些可能的误差源，您可以采用网格收敛性分析，来确保获得高精度的仿真结果。

而且，CST 工作室套装™ 还提供了对同一结构采用不同的离散方法和求解器进行仿真的功能。这一强大功能使得您可以采用截然不同的数学方法对结果进行仔细核查。

第三章 网格生成

完成几何建模并设置好激励源和边界条件后，您需要将模型转换成计算机可以接受的形式。正如上面的介绍，CST 工作室套装™的基本算法，有限积分法（FI），是一种体分割方法。您需要将计算区域分割成很小的网格，在这些网格上计算麦克斯韦网格方程（*Maxwell's Grid Equations*）。CST 工作室套装™可以在正交迪卡尔网格和四面体网格上使用有限积分法（FI）。网格会影响仿真的精度和速度，所以花点时间来理解网格的生成过程是值得的。

3.1 六面体网格生成方法

一般说来，有三种方法可以用来定义六面体网格：手动设置、自动设置、自适应设置。我们首先简要介绍三种方法的原理，然后再讨论 CST 工作室套装™中使用这些方法的细节问题。

□ 手动设置网格

您随时都可以手动设置网格，甚至是几何建模之前。这是一种过时了的工作方式，我们并不提倡使用。

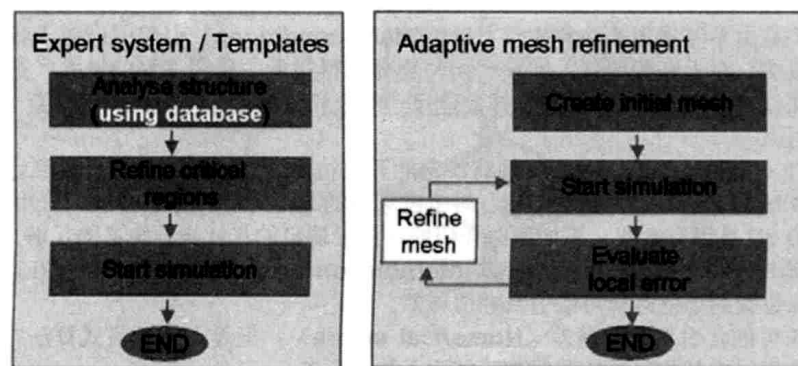
□ 自动网格生成—专家系统

这也许是使用 CST 工作室套装™最有效的方法。网格生成器确定结构的重要的特征，并自动生成网格，该网格不但很好地表征了您的结构特性，而且很好地传达了场特性。这意味着频率范围以及介质、金属边缘等都已经被专家系统考虑在内，当然，对于单个图形的特定网格属性也可以手动设置。在第一阶段，只有很少的设置会对网格生成器产生影响，但是仍有其他很多潜在的因素会对网格生成产生影响。而且，项目模板（*Project Templates*）方便了网格的生成，因此多加练习之后，您就可以在最短的时间内获得可靠的结果。

□ 自适应网格（基于能量或是基于专家系统）

自适应网格加密将代替您进行重复运行仿真并对解进行评估。通常认为，场高度集中以及场梯度很强的区域的网格需要局部加密。如果结果达到要求的精度，自适应将终止。该方法以耗费仿真时间为代价，提高起始网格分辨率。由于 CST 工作室套装™的专家网格生成器总能为网格适应过程选择合理的起始网格以及很好的起始网格分辨率，故迭代运行的次数通常会很小。

下图所示为专家系统生成网格与自适应网格加密的对比：



然而，对结构的修改会迫使传统的自适应网格算法重新启动，对参数的每一点变化都从头开始自适应网格运算。所以，自适应专家系统的六面体网格加密（*adaptive expert system hexahedral mesh refinement*）为给定的结构设定专家系统。当结构的相关部分只有稍微的变动时，网格特性保持不变。

您可以通过分析自适应网格加密的过程来增加您在网格生成方面的知识。您可以利用已有的知识手动调节网格，以便在以后的仿真中提高仿真速度。

与低频算例相比，高频问题的网格生成策略完全不同。

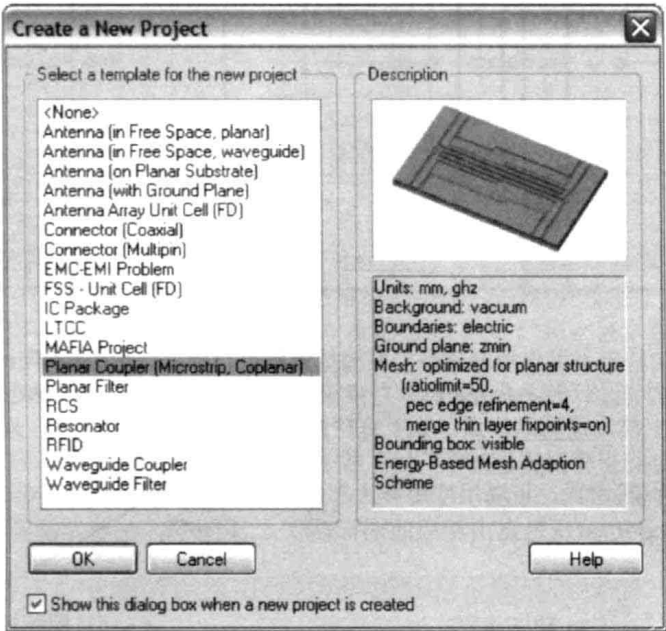
3.2 高频问题的六面体网格生成

在对网格生成技术有了总体的了解后，我们将详细介绍求解高频问题时，CST 工作室套装™的六面体网格的生成。专家系统采用很多参数来控制网格的生成，这些参数对网格产生局部或是全局的影响。您可以经常地修改其中的一些设置以获取高效的网格。让我们从最重要的全局变量开始说起：

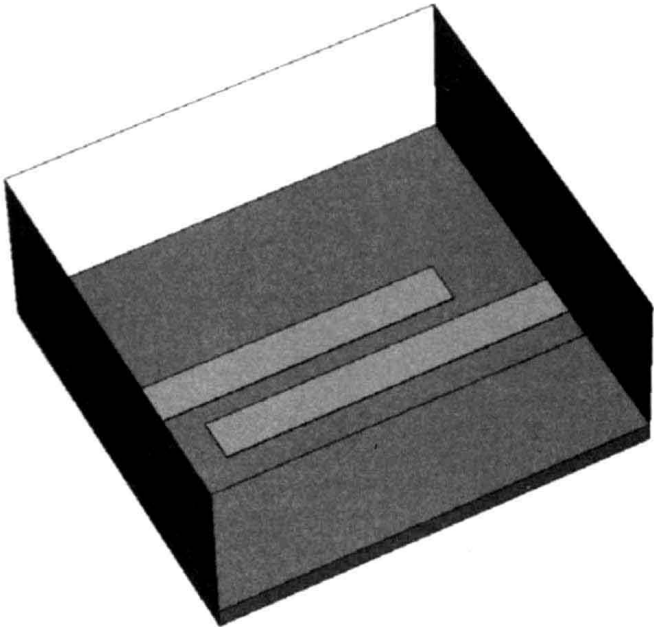
- 每波长划分的点数（*Lines per wavelength*）（适用于结构尺寸大于一个波长的问题）
- 结构线度上最小网格点数（*Lower mesh limit*）（适用于结构尺寸小于一个波长的问题）

- 最大网格与最小网格之比限制 (Mesh line ratio limit) 或最小网格步长 (Smallest mesh step)
- 加密 PEC 边缘

这些参数也可以由项目模板 (Project Templates) 和专家系统的自适应网格加密来设置。让我们启动一个新的项目，如：一个简单的耦合微带线。此时，弹出如下对话框：



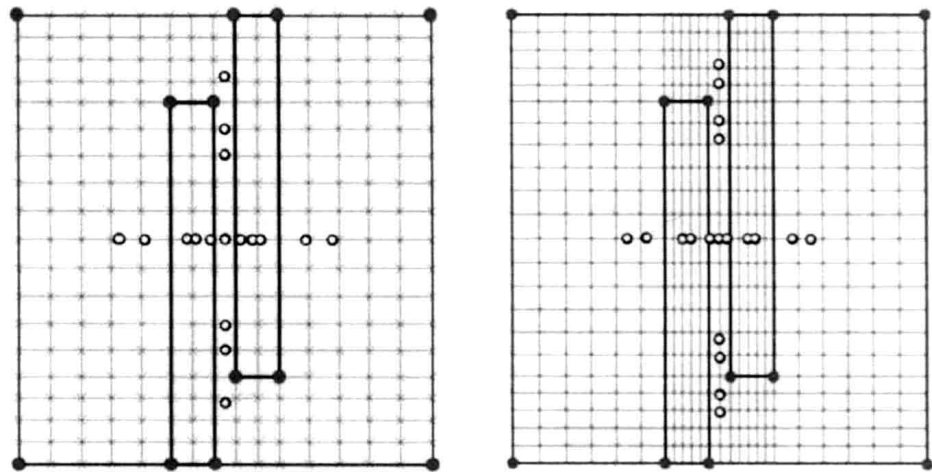
选择平面耦合器 (Planar Coupler) 模板。信息框中显示了对此类平面结构的最佳设置。随后的解释中要用的结构如下图：



请进入网格视图查看网格 (Mesh ⇌ Mesh View, )。

a) 缺省设置

b) 项目模板设置



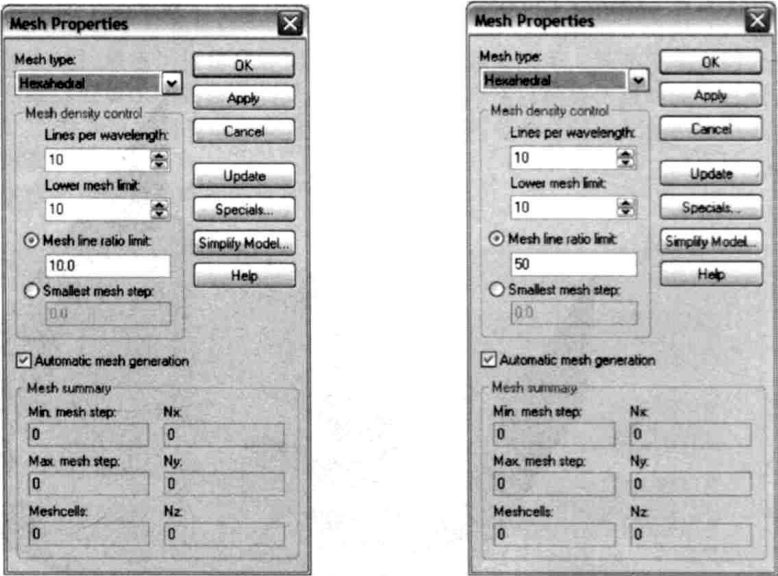
上图所示，左边是缺省设置生成的网格，右边是采用项目模板（*Project Template's*）设置生成的网格。

模型上的红点是固定点（称为*fixpoints*），专家系统会强制网格线经过这些点。您可以在边界盒子、直线的末端、圆心以及圆的半径上找到这些点。除了这些固定点（*fixpoints*）以外，黄点（图上为白点）是自适应网格加密的点。

全局网格参数的不同设置，可以用来解释上图的不同网格分布。要进一步地查看，请打开特殊设置对话框（*Mesh ⇄ Mesh Properties*或是点击相应的图标）。下图中，左边为缺省设置，右边所示为项目模板的设置。

a) 缺省设置

b) 项目模板设置



□ 网格类型

网格类型设置可以在四面体网格和六面体网格之间选择。请注意，该选项仅用于网格查看。如果有必要，求解器会自动选择相应的网格类型。

□ 每波长划分的点数（*Lines per wavelength*）（适用于结构尺寸大于一个波长的问題）

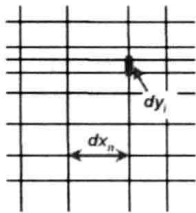
参数*Lines per wavelength*描述了场的空间采样率。将*Lines per wavelength*设为10，表示对沿着某一坐标轴传播的平面波进行至少10次采样。此时，系统会自动考虑由于材料的变化而引起的波长的改变。所以波长除以此参数决定了最大网格步长。

□ 结构线度上最小网格点数（*Lower mesh limit*）（适用于结构尺寸小于一个波长的问題）

结构线度（即最长对角线长度）除以参数 *Lower mesh limit* 就是最大网格步长。

□ 最大网格与最小网格之比限制（*Mesh line ratio limit*）或最小网格步长（*Smallest mesh step*）

参数 *Mesh line ratio limit* 决定了最大和最小网格步长的比率。由于网格线一定要经过固定点，故最小网格步长通常是由结构的局部决定的。如果不设定最低限制，将会生成很小的网格步长，因而严重影响仿真效率（见 4.2 节）。所以，当最大网格步长一定时（此值由上述两个参数决定），参数 *Mesh line ratio limit* 决定了最小网格步长。当结构的局部很小，因而生成了很密的固定点时，网格线可以不经所有的固定点。下图解释了参数 *Mesh line ratio limit* 的含义：



该图中的 dy_l 表示最小网格步长，而 dx_n 表示最大网格步长。所以，需要将参数 *Mesh line ratio limit* 设得足够大，使得网格比率至少为 dx_n / dy_l 。否则，相距最小网格步长 dy_l 的两根网格线将合为一根线。

从上面的分析可以看出，必须仔细调整参数 *Mesh line ratio limit* 的值。该参数设得太小将不利于网格对结构局部的分辨。另一方面，该值太大会使得网格步长太小而严重影响仿真性能。

作为参数 *Mesh line ratio limit* 的另一个选择，最小网格步长 (*Smallest mesh step*) 的大小也可以作为全局网格设置而直接设定。

网格属性对话框还将显示统计的网格总数、最小和最大网格步长以及沿着坐标轴任一方向的网格线数。

在网格属性对话框中点击 *Specials* 按钮，进入特殊网格属性 (*Special Mesh Properties*) 设置对话框，在该对话框中，可以对专家系统进行进一步的设置。



General 页面的 *Equilibrate mesh* 选项，可以减少相邻网格步长的局部比率，使得网格密度的变换更加平缓。

而且，选项 *Use singularity model for pec and lossy metal edges* 采用特殊模型来改进对 PEC 以及损耗金属边缘奇异性的建模。激活该功能，将显著降低这些边缘附近的网格密度要求，并可获得指定的精度。

最后，还可以对网格类型 (*Mesh type*) 进行控制。我们并不提倡您将全局网格类型 (*Mesh type*) 设置为 *Staircase mesh*，除非导入的 CAD 模型的误差使得 PBA 网格生成器失效。

选项 *PBA acceleration* 将启用一个新的矩阵计算器，对于复杂模型来说，该计算器将更快更有效。

特殊网格属性对话框的 *Refinement* 页面中也含有一些有用而且经常变动的设置。



由于 PEC 和损耗金属边缘场的奇异性，通常需要在这些边缘附近加密网格。即使激活了 *General* 页面的奇异性处理选项也需要加密网格。选项 *Refine at pec / lossy metal edges by factor* 会强制专家系统自动根据给定的系数因子在结构的边缘加密网格。该系数因子的缺省设置是 2，但是许多项目模板都会把它增加到 4 或是更大。

选项 *Consider pec / lossy metal edges along coordinate axes only* 决定了是否只在这样的边缘自动加密网格。因为需要沿着曲边加密，所以通常不需要激活该选项。

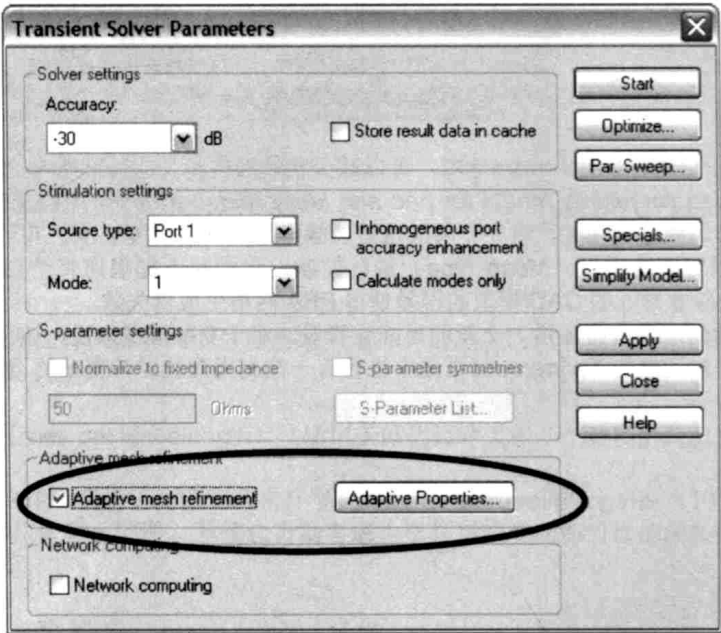
选项 *Wavelength refinement* 使得网格可以根据相应的材料属性在介质处自动加密，以满足前面介绍的 *Lines per wavelength* 的要求。缺省条件下，该选项处于激活状态，在处理高频算例时，一定要激活该选项。

3.3 高频问题的自适应六面体网格生成

只运行一次仿真，并不能获得有关解的精度任何信息。2.1 节中曾提到，有限积分法（FI）可以使得离散化误差随着网格数的增加而减小。通过加密网格，重新运行仿真然后对比结果可以检查结果的精度。当然，协调网格密度（影响仿真时间）和求解精度要求也是非常重要的。

项目模板会根据特定的结构进行全局网格设置，以获取合理的精度。生成的网格可以用作随后运行的自适应网格分析的起始网格。

下图所示为如何激活自适应网格加密，如：对于时域求解器来说，只需将 *Adaptive mesh refinement* 项打钩即可：



值 *Delta S* 表示前后两次运算所得 *S* 参量的最大误差。该误差是通过计算复杂平面上相应曲线间的真实距离所得的，而不是简单地频率对频率的比较。因此谐振频率的微小偏移只能引起很小的误差。而且，其强大的功能可以降低离频带中心较远的频点处的误差的作用。

只要 *S* 参量收敛，网格适应就会停止，比如值 *Delta S* 降到一定的限制条件下（缺省为 2%）。