

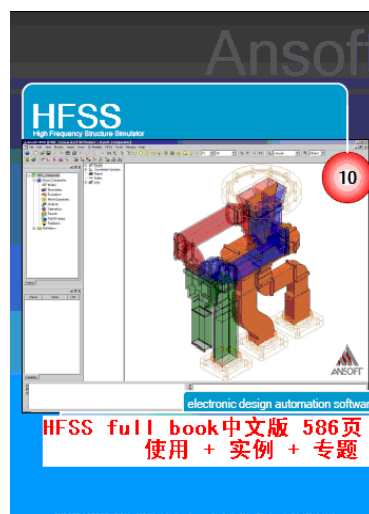
HFSS FULL BOOK v10 中文翻译版 568 页(原 801 页)

(分节 水印 免费 发布版)

微波仿真论坛 -- 组织翻译 有史以来最全最强的 HFSS 中文教程

感谢所有参与翻译, 校对, 整理的会员

版权申明: 此翻译稿版权为微波仿真论坛(bbs.rfeda.cn)所有. 分节版可以转载. [严禁转载 568 页完整版.](#)



推荐: EDA问题集合(收藏版) 之HFSS问题收藏集合 → <http://bbs.rfeda.cn/hfss.html>

- Q: 分节版内容有删减吗? A: 没有, 只是把完整版分开按章节发布, 免费下载. 带水印但不影响基本阅读.
- Q: 完整版有什么优势? A: 完整版会不断更新, 修正, 并加上心得注解. 无水印. 阅读更方便.
- Q: 本书结构? A: 前 200 页为使用介绍. 接下来为实例(天线, 器件, EMC, SI 等). 最后 100 页为基础综述
- Q: 完整版在哪里下载? A: 微波仿真论坛 (<http://bbs.rfeda.cn/read.php?tid=5454>)
- Q: 有纸质版吗? A: 有. 与完整版一样, 喜欢纸质版的请联系站长邮寄rfeda@126.com 无特别需求请用电子版
- Q: 还有其它翻译吗? A: 有专门协助团队之翻译小组. 除 HFSS 外, 还组织了 ADS, FEKO 的翻译. 还有正在筹划中的任务!
- Q: 翻译工程量有多大? A: 论坛 40 位热心会员, 120 天初译, 60 天校对. 30 天整理成稿. 感谢他们的付出!

Q: rfeda.cn 只讨论仿真吗?

A: 以仿真为主. 微波综合社区. 论坛正在高速发展. 涉及面会越来越广! 现涉及 微波|射频|仿真|通信|电子|EMC|天线|雷达|数值|高校|求职|招聘

Q: rfeda.cn 特色?

A: 以技术交流为主, 注重贴子质量, 严禁灌水; 资料注重原创; 各个版块有专门协助团队快速解决会员问题;

<http://bbs.rfeda.cn> --- 等待你的加入

RFEDA.cn

rf---射频(Radio Frequency)

eda---电子设计自动化(Electronic Design Automation)



RFEDA微波社区

微波仿真论坛 | 微波仿真网 | 博客 | 微波商城

bbs.rfeda.cn | www.rfeda.cn | blog | shop

微波|射频|仿真|通信|电子|EMC|天线|雷达|数值 ---- 专业微波工程师社区: <http://bbs.rfeda.cn>

致谢名单 及 详细说明

<http://bbs.rfeda.cn/read.php?tid=5454>

一个论坛繁荣离不开每一位会员的奉献
多交流, 力所能及帮助他人, 少灌水, 其实一点也不难

打造国内最优秀的微波综合社区

还等什么? 加入 RFEDA.CN 微波社区

我们一直在努力

微波仿真论坛

bbs.rfeda.cn

RFEDA.cn

rf---射频(Radio Frequency)

eda---电子设计自动化(Electronic Design Automation)

二 边界与激励

第一节 边界和激励重要性

一、为何边界和激励很重要?

对于大多数的实际问题而言,为了求解麦克斯韦方程需要严格的矩阵方法,例如 Ansoft HFSS 使用的有限元素法(FEM)。

Ansoft HFSS 是用微分形式的麦克斯韦方程来求解波方程的。

为了使这些微分表达式有效,前提是假设场矢量为:

- ▲ 单一值
- ▲ 有界限
- ▲ 连续分布(沿着它们导数方向)

而对于沿介质边界或者源端的前提假设则为:

- ▲ 场矢量不连续
- ▲ 场矢量导数没有意义

边界条件是通过不连续边界来决定了场行为性质的。

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}$$

二、为什么我们关心它?

因为它们迫使场沿着边界条件的定义来分布。

作为一个用户,可能会问:

- ▲ 关于场,边界条件做了一个怎样的假设?
- ▲ 这些假设能够近似的被用于仿真的结构吗?

在模型范围方面,为了把实际世界中的无限空间减少为有限的体积,Ansoft HFSS 自动在几何模型的周围表面应用边界——外部边界(Outer boundary),该默认边界为理想E边界(Perfect E)。

在模型复杂性方面,为了减少模型的复杂性,可以通过应用边界条件进行改善:

- ▲ 求解时间
- ▲ 电脑资源配置

如果不能理解边界条件,那么可能导致仿真结果和实际结果的不一致。

三、Ansoft HFSS 边界条件的共同点

激励方面:

- 波端口(外部)
- 集总端口(内部)

表面近似方面:

- 理想E或者理想H表面(Perfect E or Perfect H Surface)
- 有限导体表面(Finite Conductivity Surface)
- 阻抗表面(Impedance Surface)
- 对称表面(Symmetry Surface)
- 辐射表面(Radiation Surface)

用户有责任正确定义

材料属性方面:

两种电介质之间的边界
一个导体的有限导电性

对用户非常明确

第二节、表面近似

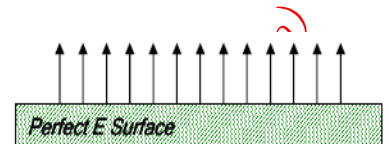
Ansoft HFSS 对于表面的近似处理有以下几种方式:

一) 理想 E (Perfect E)

理想 E 表面是迫使电场垂直于表面的近似方式, 如右图。

外部表面 (Outer Surface) 和理想导体材料属性 (PEC) 都被默认处理为该表面。

理想 E 表面通过消除导体损耗来减小模型复杂性。



二) 理想 H (Perfect H)

理想 H 表面是迫使磁场相切于表面的近似方式, 如右图。

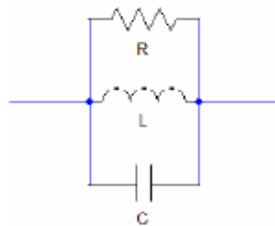


三) 有限导体 (Finite Conductivity)

有限导体表面是有损导体。它迫使电场在表面相切于 $Z_s (n \times H_{tan})$, 它的表面阻抗 (Z_s) 等于 $(1 + j) / \delta_\sigma$ 。有限导体表面通过消除导体厚度来减小模型复杂性。

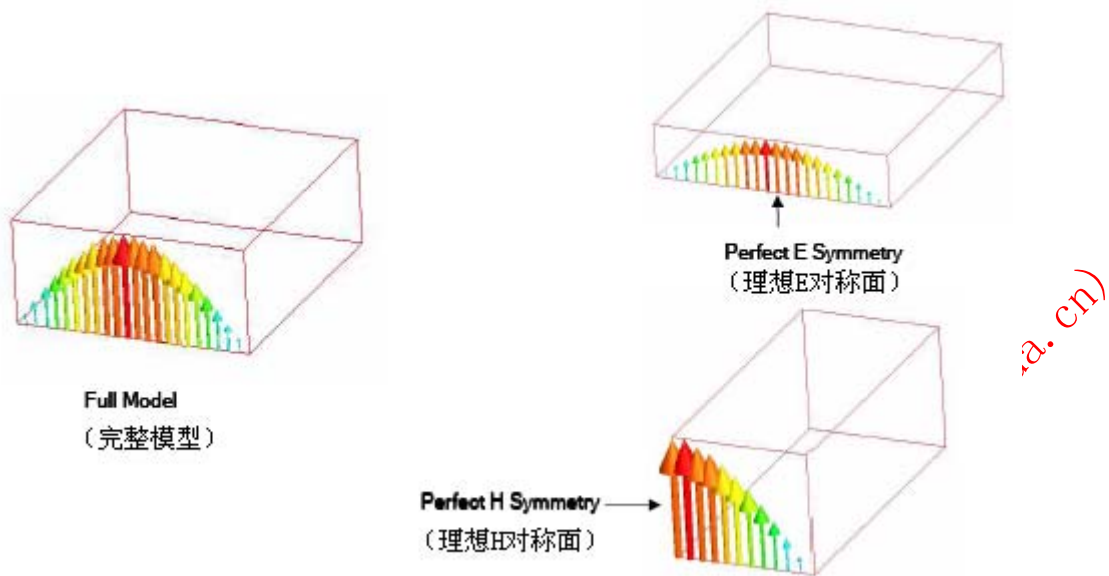
四) 阻抗表面 (Impedance Surface)

阻抗表面代表表面有一个已知阻抗。它迫使电场在表面相切于 $Z_s (n \times H_{tan})$, 它的表面阻抗 (Z_s) 等于 $R_s + jX_s$ (欧姆/平方, Ohms/Square)。阻抗表面分为: 分层阻抗 (Layered Impedance), 在多薄层结构中模型模拟为阻抗表面; 集总 RLC (Lumped RLC), 定义为 R、L、C 并联的表面, 如下图。



五) 对称平面 (Symmetry Planes)

对称平面允许你只对结构的一部分进行建模。对称平面分为理想 E 或者理想 H 对称平面。此时表面必须暴露于外表面 (outer surface), 而且必须在一个平坦表面内定义。但是必须注意: 几何对称不等于电性对称。对称平面通过消除部分求解体积来减小模型复杂性。下图是完整模型和对称面模型的示意图。



六) 辐射表面 (Radiation Surface)

辐射表面允许波辐射到无限远的空间中。且在辐射表面，边界会吸收波。辐射表面可以指定在任意表面上。辐射表面仿真精度依赖于：边界和辐射物体之间的距离，即辐射边界应该置于距离辐射体至少 $1/4$ 波长的地方。如果你仿真一个没有辐射的结构体，边界可以置于少于 $1/4$ 波长的地方（假设的有效性需要依据你的工程经验来判断）；入射角，即辐射边界将会反射大量的能量，这依赖于入射角。最佳性能是在垂直入射下得到，故应该避免入射角度处于 30 度。此外，辐射边界必须保留和入射波有关的凸面 (convex)。

七) 理想匹配层 (PML)

理想匹配层允许波辐射到无限远的空间。但是这不是一个边界条件。PML 假设的材料会完全吸收碰撞上它们的电磁场，且这些材料是各向异性的。PML 的类型有：自由空间终端或者反射自由终端。PML 仅仅能够被置于平坦表面。在模型复杂性方面，它们不会受到辐射边界距离或者入射角问题的影响，但是应该被置于至少距离强辐射体 $1/10$ 波长的地方。

八) 无限地平面 (Infinite Ground Planes)

仿真无限地平面造成的影响。在后处理中，仅仅影响近场或者远场辐射的计算。无限地平面的类型有：理想 E、有限导体，或合阻抗表面。

以下边界的参数可以使用包含频率 (Freq) 的表达式来赋值：有限导体边界，阻抗边界，集总 RLC 边界，层阻抗边界。而支持的频率扫描类型有：单点频率，离散频率扫描和插值频率扫描。

第三节、激励

端口是边界条件的唯一类型，它允许能量流进或者流出一个结构体，而且是定义在二维 (2D) 平坦表面上。任何端口解算器都是在假定的一个半无限长的波导上计算自然的场模式，且该波导与端口表面

有相同截面和材料属性的。此外，端口解算器还将 2D 场模式作为全三维（3D）问题的边界条件。

一、激励类型

一）波端口（Wave Ports）——外部

波端口推荐只应用于暴露在背景中的表面。它支持多模（例如耦合线）和端口平移（deembedding）方式，还计算频率依赖于特性阻抗（ Z_0 ）的且在每个频率点都完全匹配的通用 S 参数。

二）集总端口（Lumped Port）——内部

集总端口建议只应用于几何模型内部的表面。它只支持单模（TEM）且没有端口平移（deembedding）。它使用用户定义的常数特征阻抗 Z_0 进行归一化。

二、波动方程

波导中行波的场模式可以通过求解 Maxwell 方程获得。下面这个由 2D 解算器求解的方程，是直接由 Maxwell 方程推出的。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E}(x, y) \right) - \kappa_0^2 \epsilon_r \vec{E}(x, y) = 0$$

其中：

$\vec{E}(x, y)$ 是谐振电场的矢量表达式；

κ_0 是自由空间的波数；

μ_r 是复数相对导磁率；

ϵ_r 是复数相对介电常数。

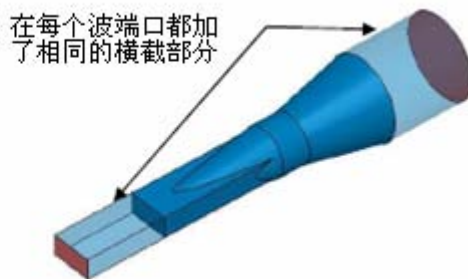
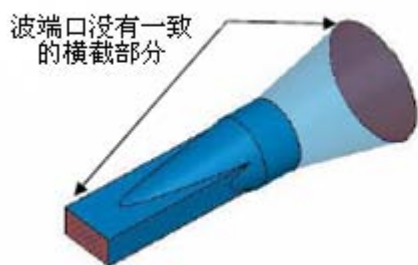
求解这个方程后，2D 解算器得到一个矢量解 $\vec{E}(x, y)$ 形式的激励场模式。这些矢量解与 z 和 t 无关，只要在矢量解后面乘上 $e^{-\gamma z}$ ，它们就变成了行波。另外，我们需注意计算出的激励场模式只能在单一频率上有效。对于每一个感兴趣的频率，计算出的激励场模式会不一样。

三、模式、反射和传播

在单一模式的信号激励下，三维场的解算结果中仍然可能包含由于高频结构不连续引起的高次模反射。如果这些高次模反射回激励源端口，或者传输到另一个端口，那么和这些高次模相关的 S 参数就必须被计算入内。如果高次模在传播到任何其它端口前，因损耗或者它是非传播模式而造成衰减，那么我们就可以不考虑这些高次模的 S 参数。

四、波端口要求一定长度的同质交截部分

Ansoft HFSS 假定你所定义每个端口都与一个半无限长波导相连, 这个半无限波导具有与波端口相同的交截部分, 如下图所示。



五、波端口边界条件

波端口的边界条件可以设置为以下几种:

一) 理想 E 或者有限导体边界

Ansoft HFSS 默认所有外边界都是理想 E 边界。波端口是在一个波导中定义的。对于闭合传输线(同轴或者波导)很方便的设置为波端口。对于非平衡或者非闭合传输线(微带, CPW, Slotline, 等等)则很具挑战性。

二) 对称或者阻抗边界

在端口边缘设置 (Recognized)。

三) 辐射边界

默认接口是理想E边界。

六、集总端口边界条件

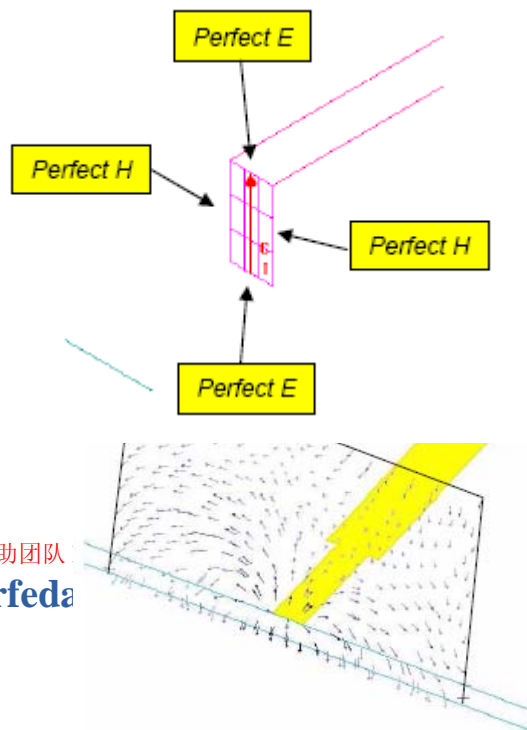
集总端口的边界条件可以设置为以下几种:

一) 理想 E 或者有限导体

在任何与导体或者另外一个端口交截的端口边缘设定, 如右图所示。

二) 理想H

在其他所有残余的端口边缘设定, 如右图所示。



七、激励校准

为了保证结果的一致性，端口必须进行校正。校准时需考虑以下问题：场的方向性、极性和电压的计算。校准时有以下相关事项：

一）求解类型：驱动模式

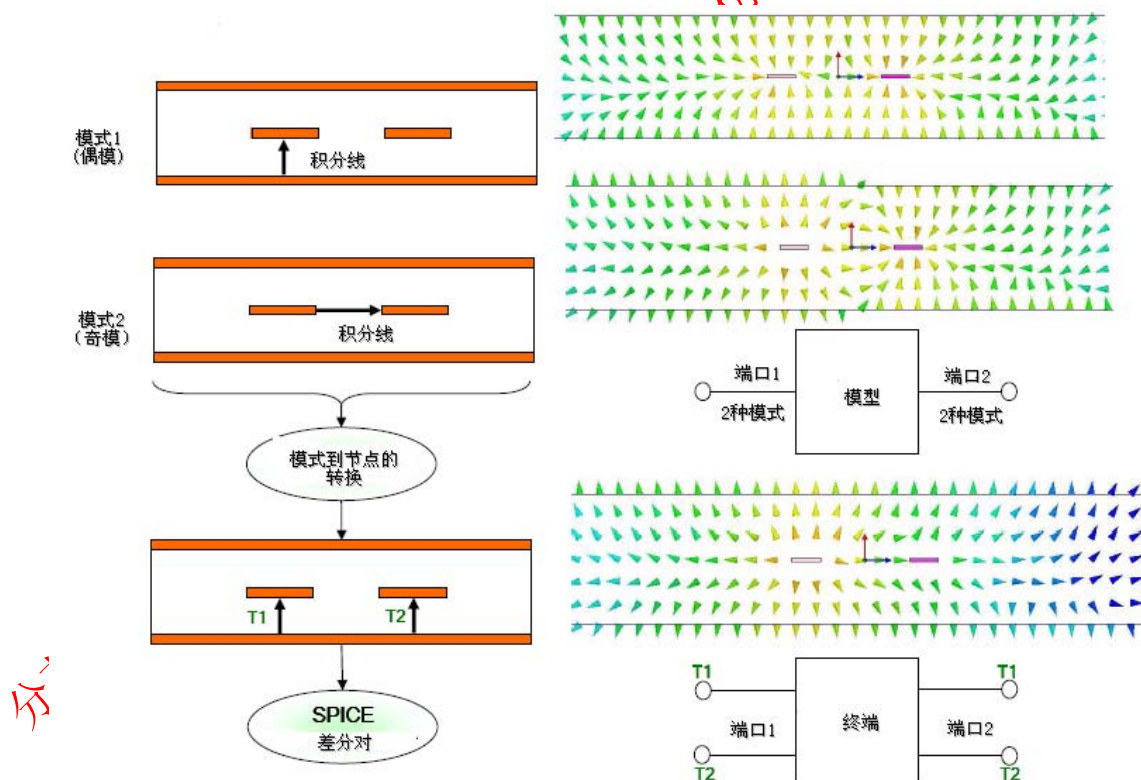
驱动模式是用波导模式的输入和反射功率来表示的。对于含有几个准TEM（quasi-TEM）模式的问题而言（耦合传输线或者多耦合传输线），该定义不是令人满意的。驱动模式是求解器最常用的求解类型。该求解类型的校准方式有：积分线校准和端口间的相位校准。电压模式积分路径有： Z_{pi} （用功率和电流计算特性阻抗）， Z_{pv} （用功率和电压计算特性阻抗）， Z_{vi} （用电压和电流计算特性阻抗）。

二）求解类型：驱动终端

驱动终端求解类型反映的是波端口节点电压和电流的线性叠加，是从模式解（Modal Solution）中完成等效转换。该求解类型的校准：终端线，极化，和节点电压积分路径。

八、解算类型实例

下图是解算类型的分解图示。



九、边界条件的应用

情况 1:

微波仿真论坛 组织翻译

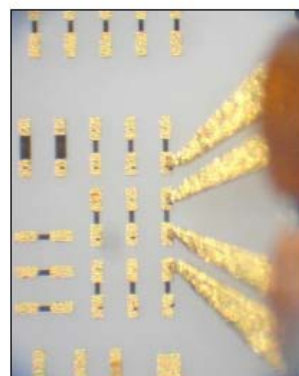
原创: 微波仿真论坛(<http://bbs.rfeda.cn>) 协助团队 HFSS 小组 --- RFEDA.cn 拥有版权

<http://www.rfeda.cn> <http://bbs.rfeda.cn> <http://blog.rfeda.cn>

在生产产品前进行验证/确认——效仿实验室测量，如下图所示。



Delphi公司的免费图片

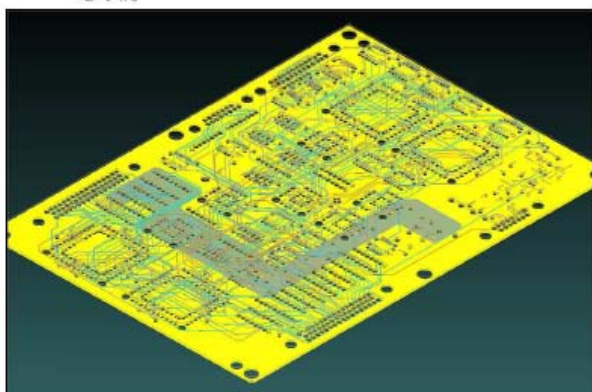


Tektronix公司的免费图片

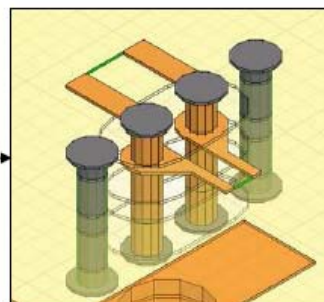
情况 2:

结构体是隔离器件（例如：激励任意传输线）。该隔离部分在实验室是无法用物理方式进行测量的。对于整个系统而言，或因总系统过于复杂，全波分析也是没有必要。隔离部分常用于设计工作/元器件级的优化和产品后期问题的解决，如下图所示。

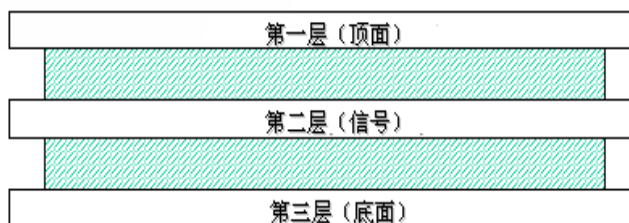
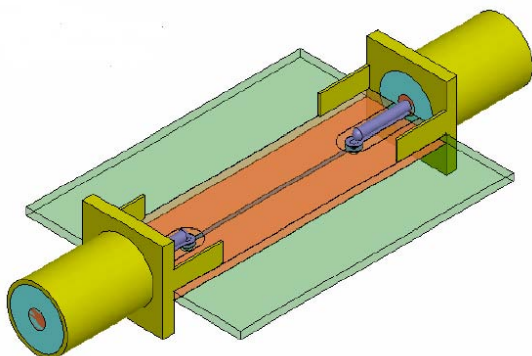
总系统



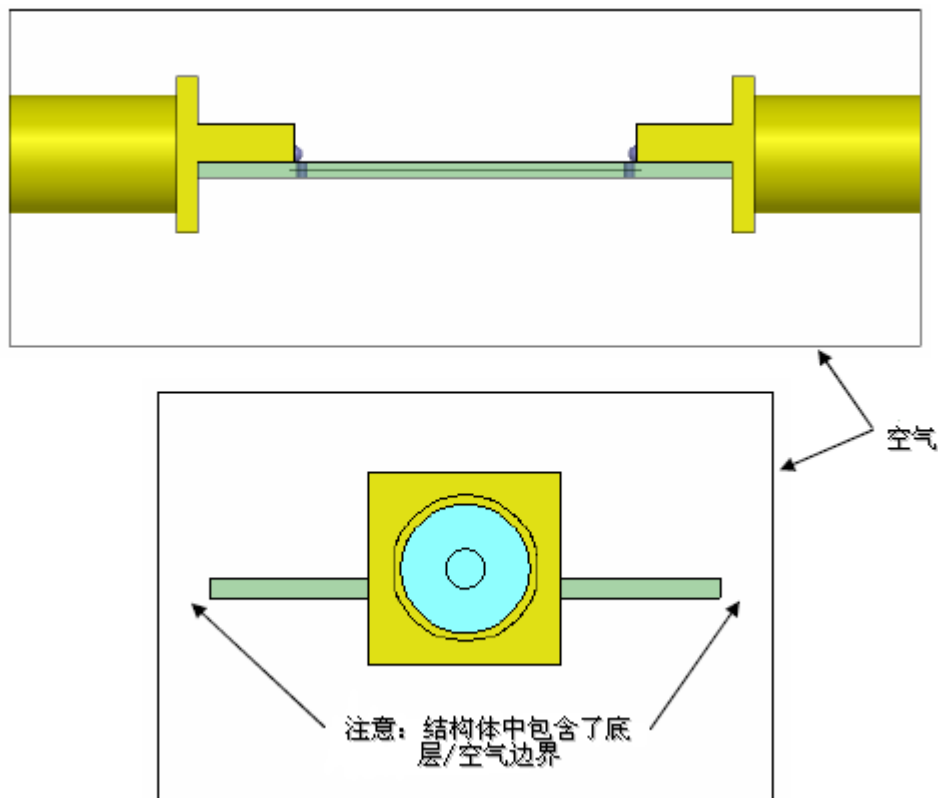
隔离器件——过孔传输



以上情况的结构体实例如下图所示。该例是同轴线到带状线的连接结构。



例子中的所有三维（固体）物体的材料都必须进行定义。此外，为了完成前面所示的模型的建模，我们必须把围绕结构体的空气也包含入内，如下图所示。



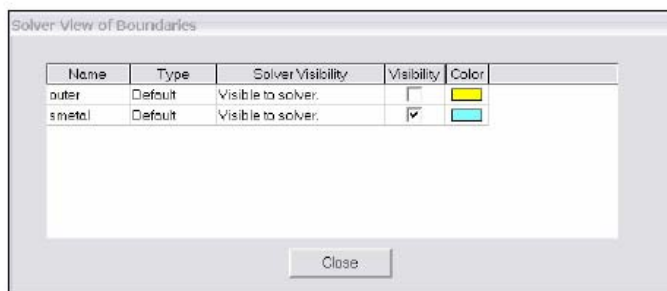
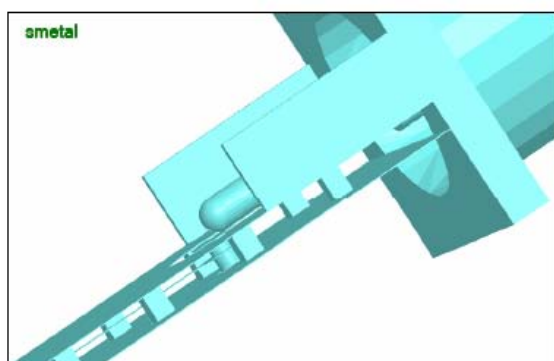
切记：材料边界条件对用户来讲是非常明确的（transparent），而且它们在项目树（Project Tree）中是不可见的。

十、材料边界例子

材料边界定义过程是：导体（Conductors）→表明近似（Surface Approximations）。

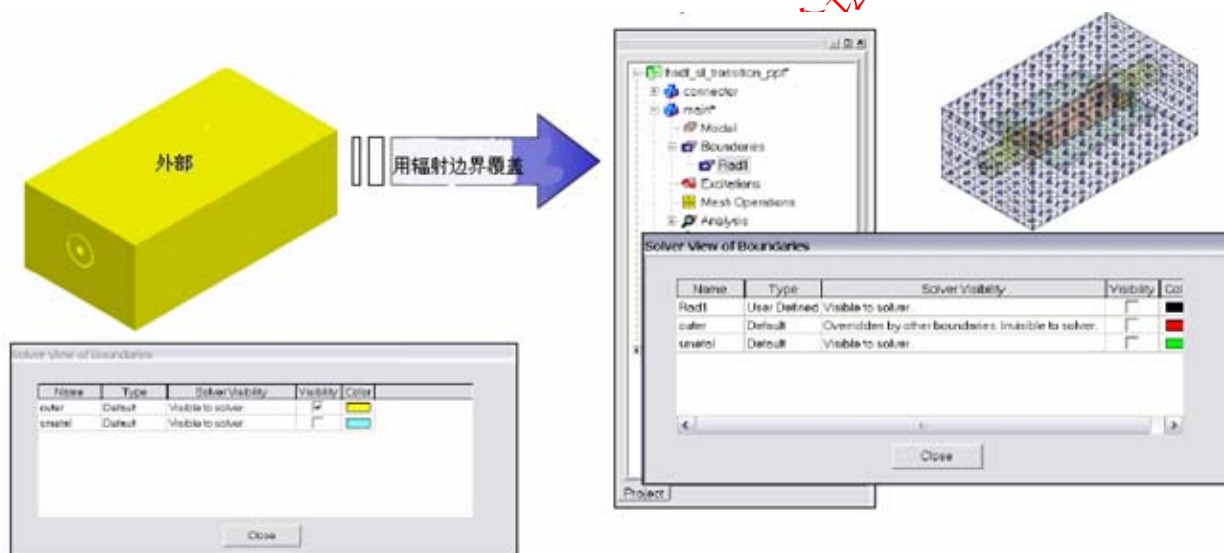
对于理想导体过程是，理想导体（Perfect Conductors）→理想E边界（边界名称：smetal，如下图）（Perfect E Boundary (Boundary Name: smetal)），该边界条件迫使电场垂直于表面。

对于有损导体，有损导体（Lossy Conductors）→有限导体边界（Finite Conductors Boundary），该边界条件迫使电场相切于 $((1+j)/\delta_\sigma)(n \times H_{tan})$ 。如果用户设定了趋肤深度，那么就必须手动设置 Ansoft HFSS 对损耗导体中小于等于一个趋肤深度的部分进行求解。



十一、表面近似

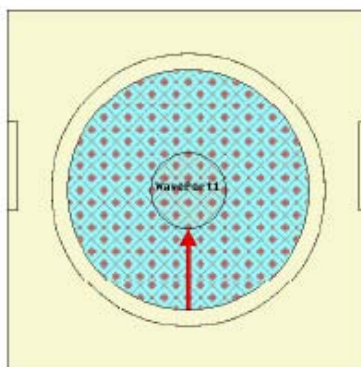
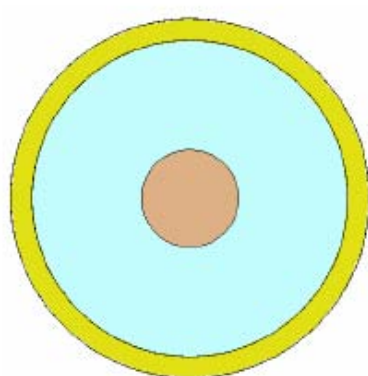
对于背景或者外部边界的表面，它们在项目树中（Project Tree）是不可见的。任何接触背景或者外部表面的物体表面都默认为理想 E 边界（Perfect E Boundary）。这些默认边界应用于围绕几何模型的空间，即模型被一层薄金属层完全包住，任何场都不能穿透该金属层传输到外部。



第四节、端口设置的问题

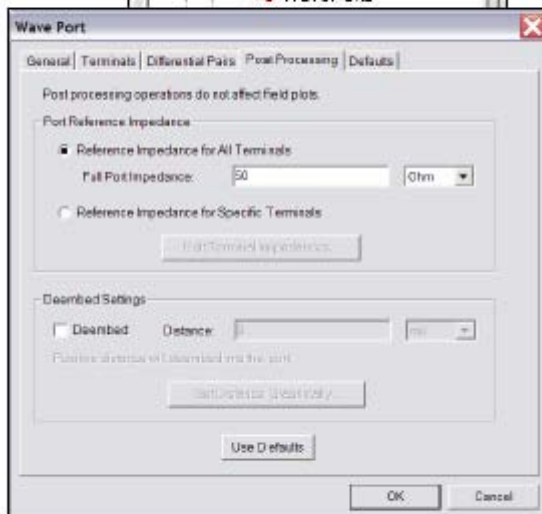
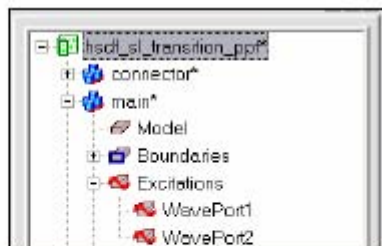
对于用户而言，用户关心的是应该使用哪一种端口类型。此处所举的例子中，端口类型是很容易决定的。且端口接触到背景（外部），交截部分是同轴电缆（附在传输线上）。使用的是波端口，解算类型是驱动终端（Driven Terminal），输出类型为 SPICE 输出。设置过程如下图所示。





确定端口类型和交截部分

指定激励并校准端口



定义默认的后处理方式

事实上是否的确如此简单就能完成端口的设置呢?

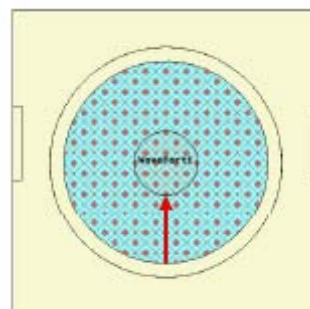
答案是肯定的,但是在完成几何模型的建立时需要考虑以下几点:

1. 仅仅是同轴介质的表面被选为端口表面。端口边界条件是在

微波仿真论坛 组织翻译

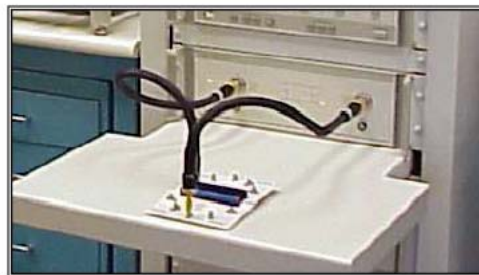
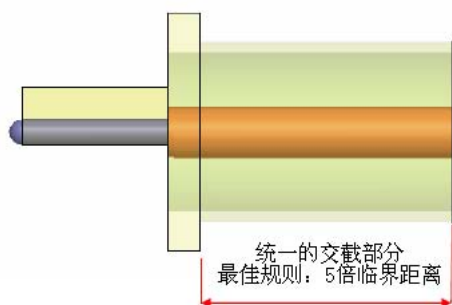
原创:微波仿真论坛(<http://bbs.rfeda.cn>) 协助团队 HFSS 小组 -

<http://www.rfeda.cn> <http://bbs.rfeda.cn> <http://www.rfeda.cn>



外部导体上定义，材料则是在导体内部定义，如右图所示。

2. 端口的交截部分必须统一。统一的交截部分可以实现仅支持单一模式，可以使由反射造成的高次模在到达端口前就得到足够衰减。当假设波沿 Z 方向传播时，模式将按照 $e^{-\alpha z}$ 的函数衰减。此外，需要的距离（统一部分的端口长度）取决于模式传播常数。如下图所示。



运用如此简单的端口设置情况有：

第一种情况，如果你需要效仿实验室测量。大多数时候是这种情况，因为实验室的仪器并不是直接连接到任意形式的传输线上。但例外的是，用端口效仿一个复杂的探针时，你需要对探针有深入的理解，这时端口设置就没有如此简单了。

第二种情况，如果你需要对一个结构体进行隔离。在实际设计中，你常常没有那么好运。这时候用户必须正确的理解或者实现以下几点：

1. 端口边界条件和边界条件的影响；
2. 结构体中的场分布；
3. 对端口求解器做出的假设；
4. 反馈路径。

以下是一些与结果相关的问题。

它们可以分为以下两大类：

1. 复杂结构体问题。例如 BGA, 底板 (Backplane), 天线反馈, 波导设备 (Waveguide "Plumbing"), 等等。它们大部分共同的问题源于：测量的设置，比如测试夹具 (Test fixtures), 端口平移 (deembedding), 等等；不能理解结构体内部的场分布，这会导致边界问题；模型切断而引起的反馈路径问题。

2. 简单结构体问题。例如基于方程或者电路原理的均匀 (uniform) 传输线。它们大部分共同问题源于：不正确的使用默认值或者激励边界条件，不能理解被“正确”结果使用的假设前提（如方程或者电路原理）。

端口设置为何如此重要？

因为任何注入到系统的电流必须回流到源。对于直流，需要选择阻抗最小的路径；对于交流则需要选择感抗最小的路径，信号应在它的信号线和参考平面之间传输。参考平面和信号线是同等重要的！

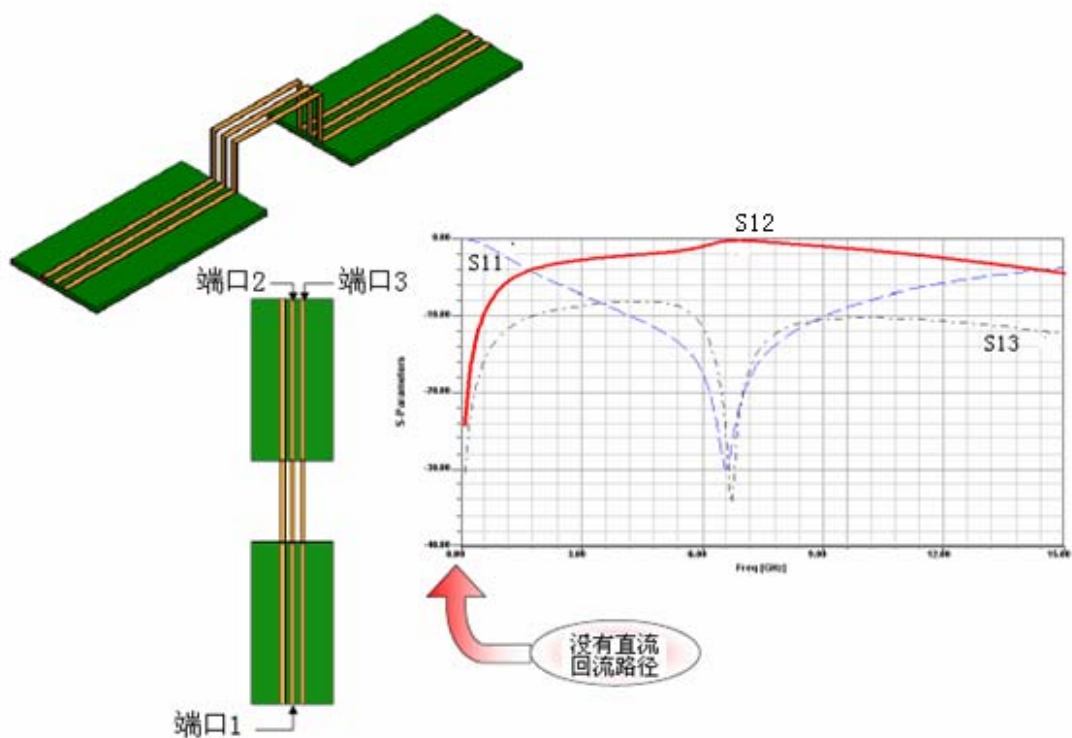
为什么我们需要关心端口设置呢？因为：

1. 许多实际设计中没有理想的回流路径，这些影响只能通过全波仿真器来捕获。
2. 当结构体中有隔离部分时，如果不能正确的保持回流路径，这将会限制测量结果的正确性，或者掩盖或者产生设计问题。端口和边界设置是建模中大部分普遍错误产生的根源。

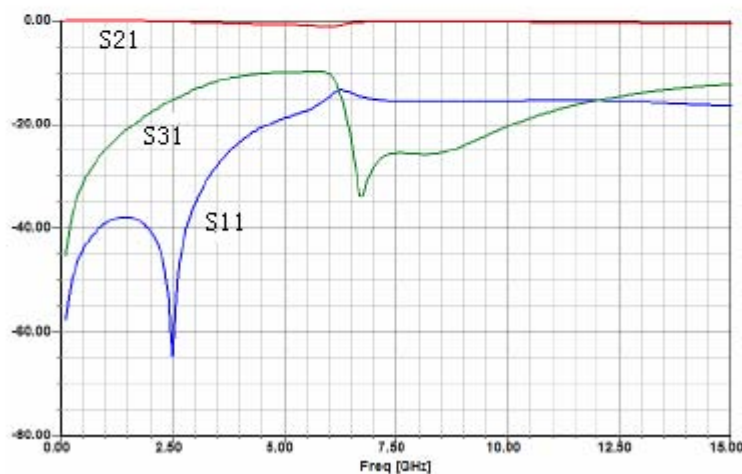
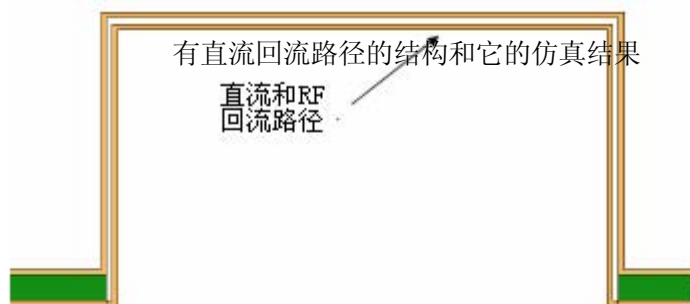
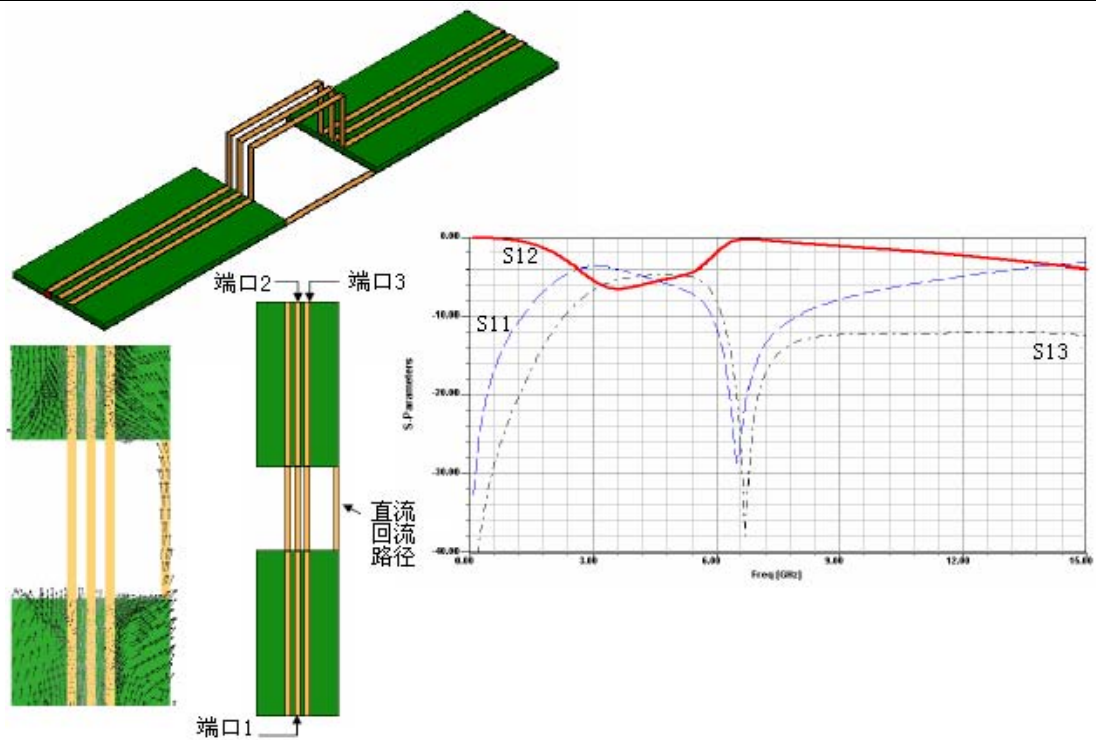
第五节、端口设置举例

一) 回流路径实例

下面的两张图中，第一张是一个没有直流回流路径的结构和它的仿真结果；第二张是有直流回流路径的结构和它的仿真结果。可见两者的仿真结果有很大的差别，这个差别主要体现在 S12 上。F.2.4.1 中端口 12 之间没有 DC 回流路径，F.2.4.2 中端口 12 有 DC 回流路径，因而 F.2.4.2 中的 S12 才能正确的反映端口 1 和端口 2 之间的传输参数。



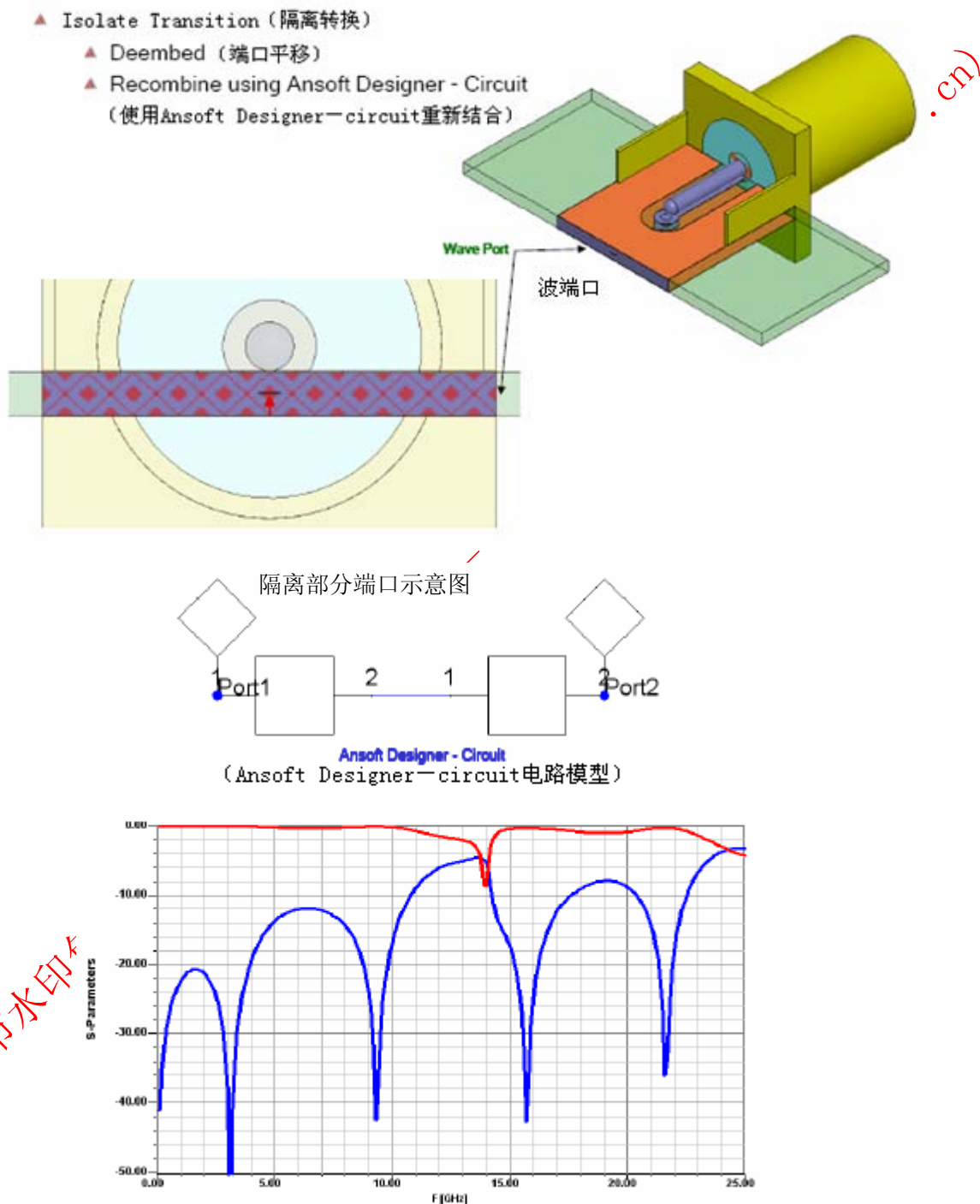
没有直流回流路径的结构和它的仿真结果



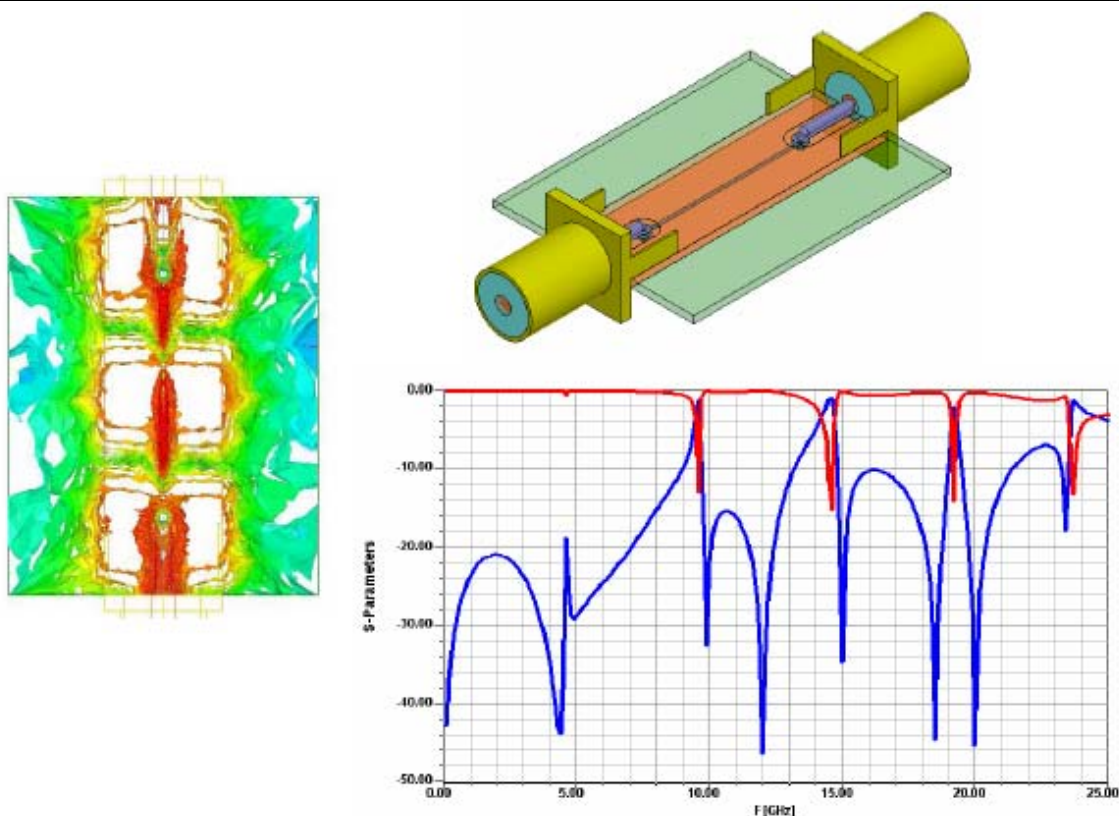
提供 DC 和 RF 回流路径的结构和它的仿真结果

二) 结构体中的隔离部分——第二种情况的例子

该例子的端口示意图如 F2.5.4 所示, F2.5.5 是在 Ansoft Designer 中对应的模型和仿真结果(错误), F2.5.6 HFSS 中仿真后的场分布和结果(正确)。

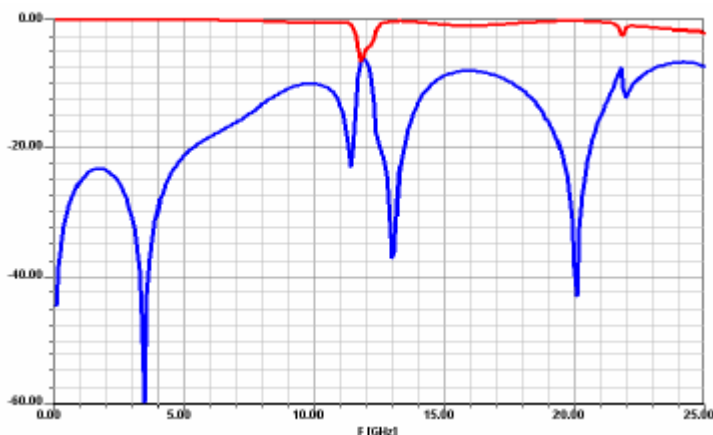


Ansoft Designer 中对应的模型和仿真结果

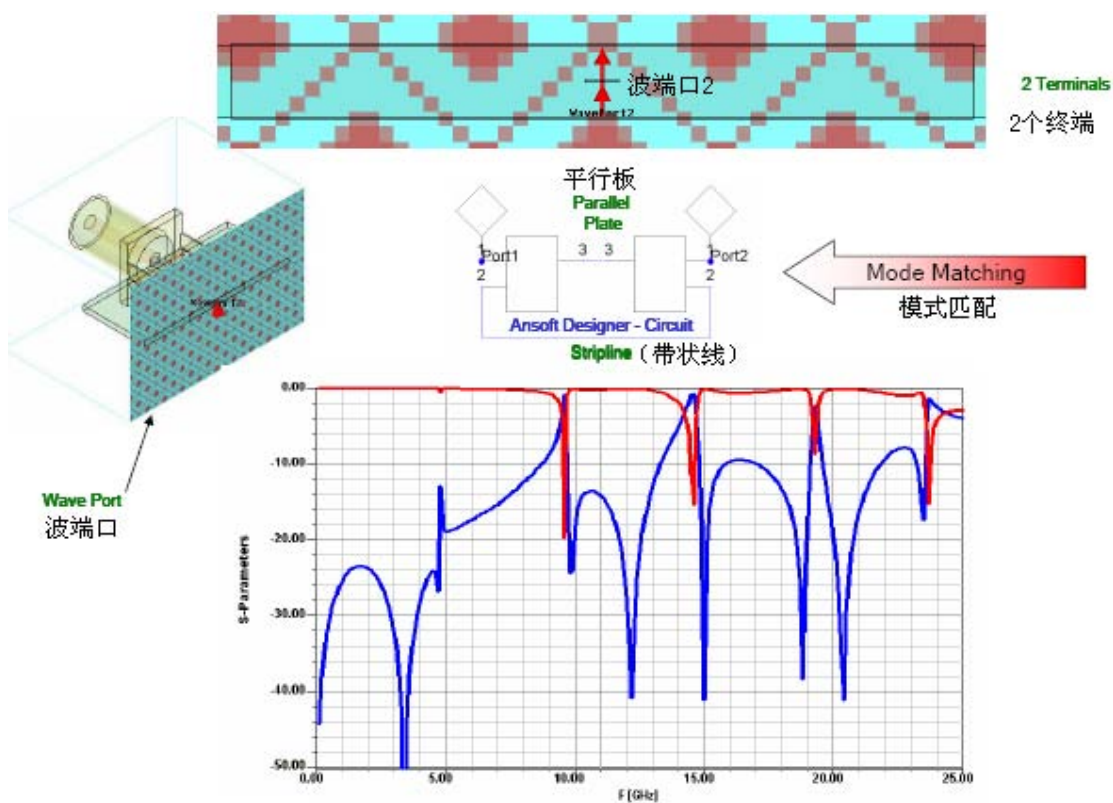


HFSS 中仿真后的场分布和结果

对比两个仿真结果,可见结果相差很大。这是哪些部分出现了错误呢?是否是隔离端口的不连续性?事实上的确如此。两个端口的交截部分一致吗?不一致,端口的交截部分(包含边界条件)在 Designer 中没有得到保留。回流路径保留吗?没有, Designer 中端口上的边界在边缘处和平面短路到一起了。同样,对于在端口边界放置的过孔也会出现这种情况。是否考虑了所有的模式?没有,平行板传输模式(Parallel Plate mode)没有考虑入内。即使我们考虑了,过孔(端口边缘上)也会截断模式,如 F2.5.7 所示。所以,我们应该合理的使用过孔。修正以上错误后, Designer 中的仿真结果如图 F2.5.8 所示。

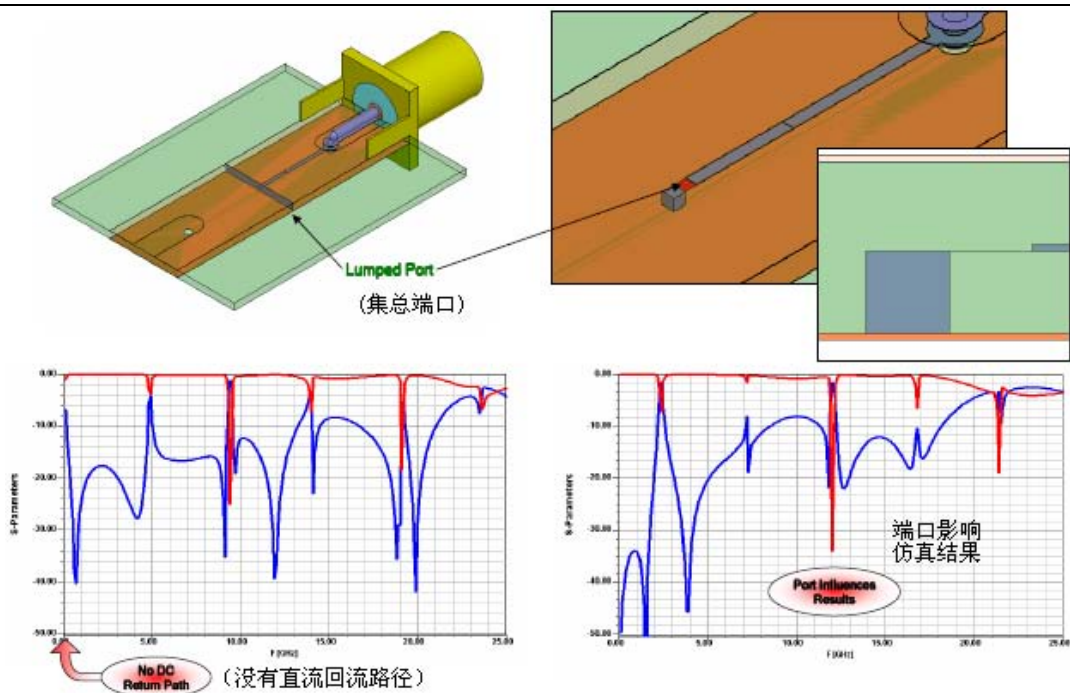


模式截断后的结果

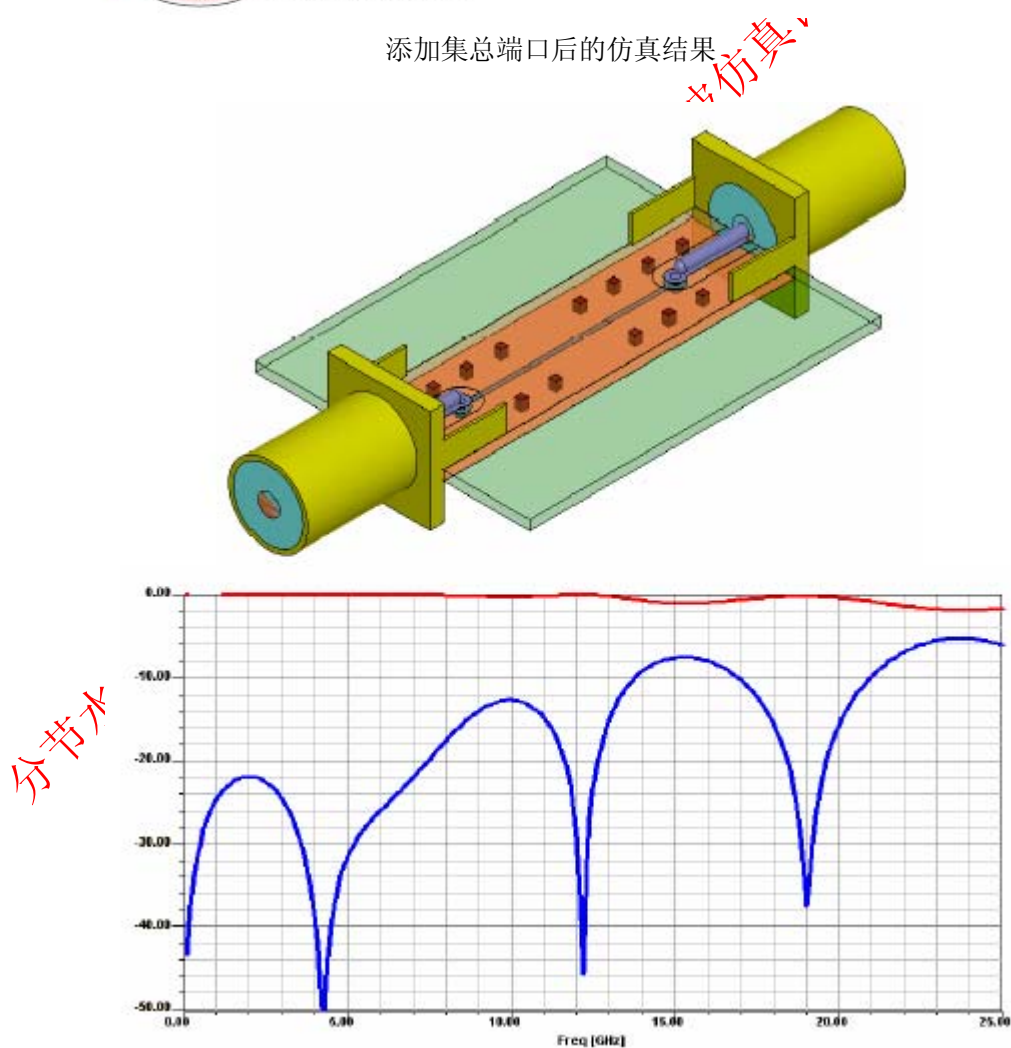


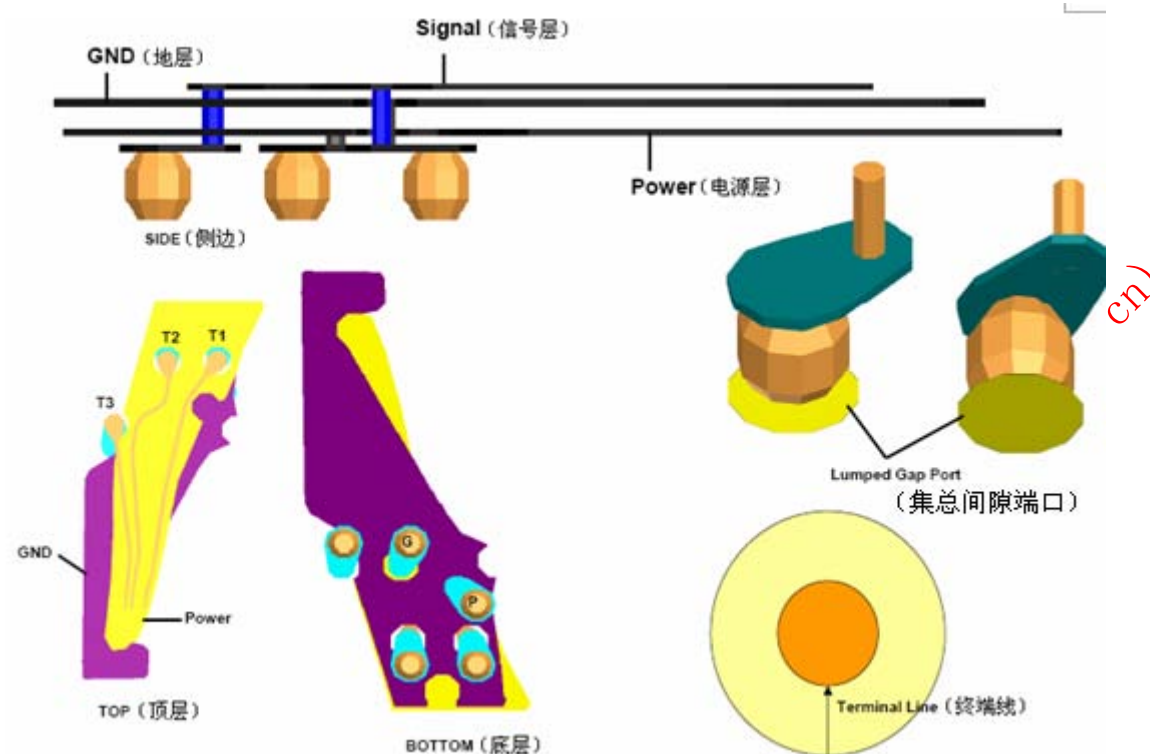
修正后 Designer 中的仿真结果

图 F2.5.9 是添加集总端口类型后的仿真情况。左边的仿真结果是没有直流回路路径时的仿真结果，右边的仿真结果是模型正确时添加集总端口后的仿真结果。

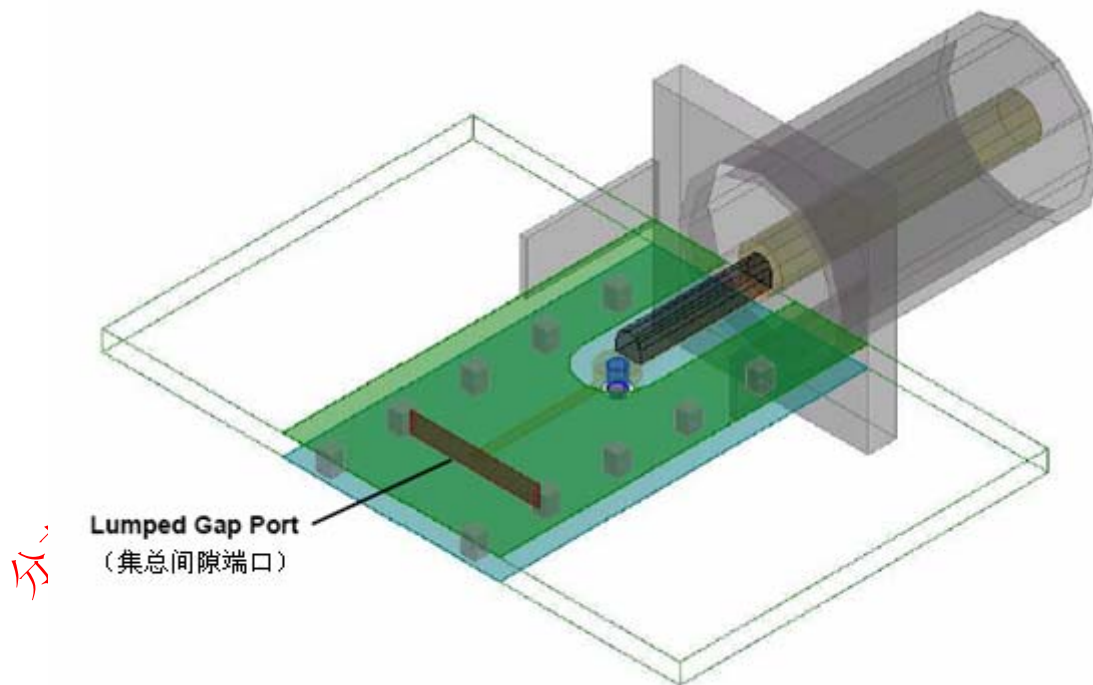


添加集总端口后的仿真结果

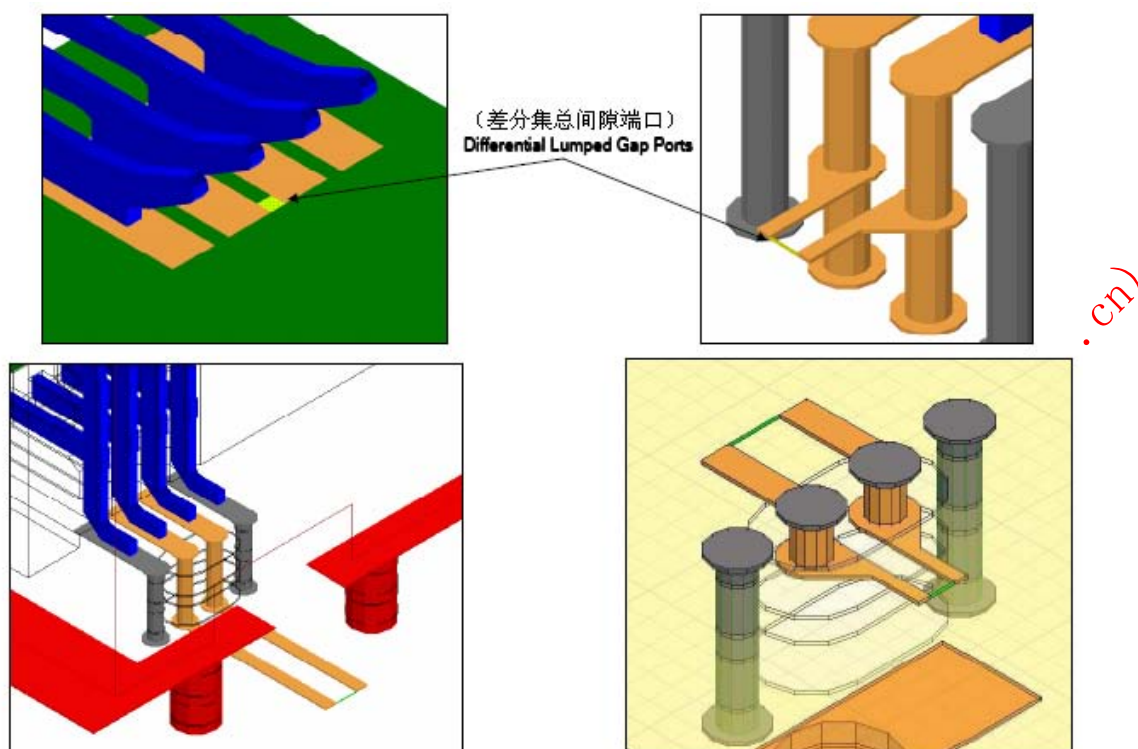




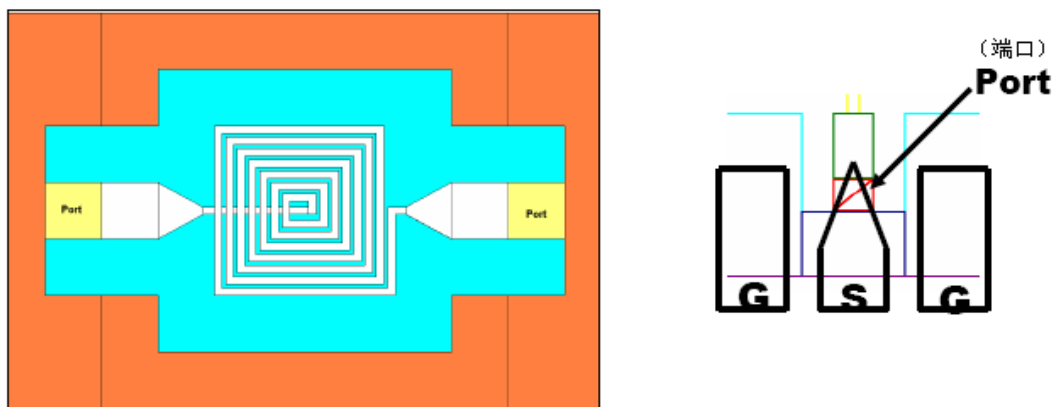
模型结构分解图



集总间隙端口示意图



差分集总间隙端口结构示意图



微带螺旋电感中的端口示意图

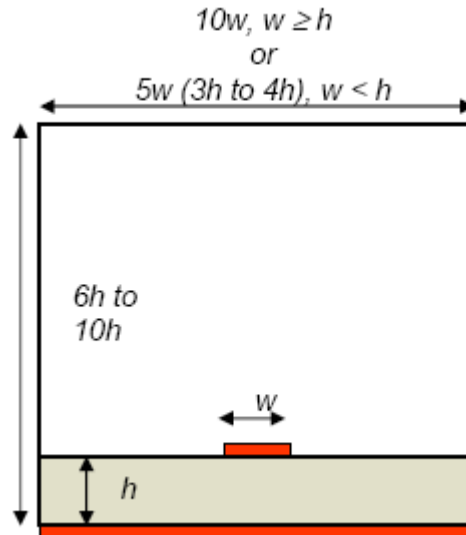
第六节、设置端口尺寸向导

一) 微带端口尺寸设计向导

首先, 假设微带宽度为 w , 介质层高度 h 。

端口高度设计向导：端口高度应在 $6h$ 到 $10h$ 之间。高度界限随着电介质常数的减小而增加，并且空气中的场分布要比介质层中的场分布要多。端口的底边和地平面的上表面要共面。如果实际的结构低于这个向导，那就按照实际结构建模。

端口宽度设计向导：如果微带剖面 $w \geq h$ ，则端口宽度为 $10w$ ；如果微带剖面 $w < h$ ，则端口宽度为 $5w$ ，或者按照 $3h$ 到 $4h$ 的顺序设置。如下图所示。



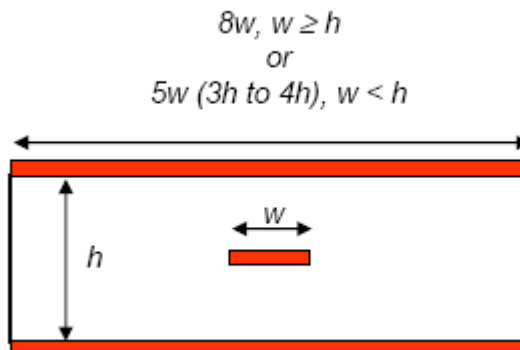
二) 带状线端口尺寸设计向导

首先，假设带状线宽度为 w ，介质层高度 h 。

端口高度设计向导：从较高层面延伸到较低地平面 h 。

端口宽度设计向导：如果微带剖面 $w \geq h$ ，则端口宽度为 $8w$ ；如果微带剖面 $w < h$ ，则端口宽度为 $5w$ ，或者按照 $3h$ 到 $4h$ 的顺序设置。

边界设置提示：此时可以将端口的边壁设置为理想 H (Perfect H) 边界。



完整版 目录

版权申明: 此翻译稿版权为微波仿真论坛(bbs.rfeda.cn)所有. 分节版可以转载. [严禁转载 568 页完整版](#)
如需纸质完整版(586 页), 请联系 rfeda@126.com 邮购

封面.pdf
hfss_full_book中文版.pdf
002-009 内容简介
绪论
010-021 HFSS 用户界面
022-051 创建参数模型
第一章 Ansoft HFSS参数化建模
052-061 边界条件
062-077 激励
第二章 Ansoft HFSS求解设置
078-099 求解设置
第三章 Ansoft HFSS数据处理
100-125 数据处理
第四章 Ansoft HFSS求解及网格设定
126-137 求解循环
137-155 网格
第五章 天线实例
160-181 超高频探针天线
182-199 圆波导管喇叭天线
200-219 同轴探针微带贴片天线
220-237 缝隙耦合贴片天线
238-259 吸收率
260-281 共面波导(CPW)馈电蝶形天线
282-303 端射波导天线阵
第六章 微波实例
306-319 魔T
320-347 同轴连接器
348-365 环形电桥
366-389 同轴短线谐振器
390-413 微波端口
414-435 介质谐振器
第七章 滤波器实例
438-457 带通滤波器
458-483 微带带阻滤波器
第八章 信号完整性分析实例
486-525 低压差分信号(LVDS)差分线
526-567 分段回路
568-593 非理想接地面
594-623 回路
第九章 电磁兼容/电磁干扰实例
624-643 散热片
644-665 屏蔽体
第十章 On-chip无源实例
668-697 螺旋形传感器
第十一章 相关知识补充
698-757 综述
760-801 边界与激励
致谢.pdf