

一篇文章入门高频电路三维有限元

原创 www.cae-sim.com [多物理场仿真技术](#)



本文的所有内容基于作者的研发经历，偏向于研发测试人员，如有错误的地方，欢迎指正。

从以下几个方面介绍高频电路三维有限元仿真：

高频理论以及数值计算

高频电路简介

有限元理论

边界荷载

材料相关

几何和网格

后处理

高频理论以及数值计算相关

通常把高于0.5到1G赫兹的频率称为高频。在高频电磁场数值仿真领域，有限元成为非常有效的计算方法，HFSS，ADAS，CST以及mentor 高频仿真软件等都使用了有限元方法，当然这些软件中也使用了其它算法（参考附录），以后单独讨论。其中HFSS历史最为悠久，成为高频领域仿真事实上的标准，HFSS现归在ANSYS公司。

历史上，在有限元方法成功解决结构应力应变分析问题之后，科学家们自然而然想到把有限元方法应用在求解电磁场问题上，早期选择了和结构分析一样的基函数形函数，基函数使用电场和磁场强度的多项式表达式，将电磁强度放在节点上，但是在计算中发现常出现伪解，同时边界上很难处理。于是科学家们发明了棱边单元，将自由度放在边而不是节点上，扫除了有限元方法在电磁领域应用的障碍。

高频电路简介

电小尺寸，电大尺寸。

如果我们认为物理尺寸远远小于一个波长的时候,即 $k \ll 1$, 该结构是电小尺寸, 反之, 是电大尺寸。那么, 这就是一个近似的标准。这一小段距离应该有多小? 对此, 并没有统一的标准, 但是, 我们假设, 当物理尺寸小于波长的 $1/10$ 时, 相位的变化就可以忽略, 这样的结构就被认为是电小尺寸。

参考平面: 参考平面是高频电路分析中常用到的一个概念。参考平面主要有两个作用: 一是提供返回电流路径, 参考平面一定是返回路径, 但是返回路径不仅仅包含参考平面, 还可能包含与信号线同层的邻近导体; 二是提供阻抗控制功能。高频电路是典型的电小尺寸。

高频下, 电路中的电磁场会呈现一些特殊现象:

高频电路中, 由于趋肤效应, 电流会在聚集在金属的表面流动, 聚集程度取决于频率的高低; 寄生效应明显

材料相关

又称电容率或相对电容率, 表征电介质或绝缘材料电性能的一个重要数据, 常用 ϵ 表示。它是指在同一电容器中用同一物质为电介质和真空时的电容的比值, 表示电介质在电场中贮存静电能的相对能力。

导电率, 多称为电导率, 是表示物质传输电流能力强弱的一种测量值。当施加电压于导体的两端时, 其电荷载子会呈现朝某方向流动的行为, 因而产生电流。

许多介质的介电系数或其它本构参数随频率而变化, 这类介质称为色散介质。色散介质的常用频域模型有以下几种:

1. Drude模型

Drude模型常用于等离子体, 金属等介质的色散特性描述。

2. Debye模型

Debye模型常用于土壤, 水, 人体组织等介质。

3. Lorentz模型

Lorentz模型可用于生物组织, 光学材料, 人工介质等介质。

表面粗糙度:

通常仿真时假设导体表面非常光滑, 但实际导体表面存在小突起有很多毛刺。表面粗糙度通常用表面凸起高度的均方根来衡量。由前面介绍的趋肤效应, 电流在高频时会在金属表面聚集, 金属表面粗糙会显著增加信号的损耗。

几何和网格

既然是有限元分析，就离不开几何和网格。

电路中的三维几何实体相对简单，走线，焊盘等多以长方体，圆柱体，正多边形拉伸体为主，再复杂比如扫掠的圆柱金线以及球形的焊球，梯形截面扫掠实体，少有建筑，机械中的复杂曲线曲面。当然其它器件比如连接器，接插件等会有各种曲线曲面几何，增加了几何处理的复杂程度。在实际仿真中一般很少会在三维设计软件中设计三维几何的电路，而是导入外部的二维设计文件，然后生成三维几何。三维软件主要以设计单元个数有限的组件(component)为主。

电磁三维仿真基本上都使用四面体网格，主要原因是四面体网格生成相对容易，而且四面体对复杂几何的适应性强。对于规则的几何，六面体其实是最佳选择，尤其是电路结构中的走线非常适合使用六面体，电磁六面体单元不存在结构分析中的沙漏和锁死问题，在不降低精度的同时以大幅减少网格数量，但实际工程中，各种非规则几何比如过孔，焊球，金线，连接器等，使得生成理想六面体比较困难。对于四面体结构，如果需要提升精度，简单加密网格数量或者提升阶次即可满足要求，同时由于使用了矢量单元，自由度放在边上，不存在结构刚度过大的问题，所以在网格的选择上，结构应力分析所摒弃的四面体反而成了电磁分析的最佳选择。

电磁求解的对象是麦克斯韦方程偏微分方程，理论上会有无数通解，为了得到定解就需要给定边界条件，同时为了验证电路信号完整性，电源完整性，对于非谐振，需要给定激励和荷载，通过S参数，Q品质因子等来判断电路的质量好坏。一般电磁软件中都提供了UI方便用户将激励和边界条件加载到几何对象上。

S参数

在高频电路中，经常会听到S参数。S参数是衡量电路质量的有效方法。S参数将复杂的电路看成一个黑盒，只在用户感兴趣的端口加激励，通过不同端口的能量入射和反射情况来确定电路的好坏，简化了三维电磁场分析工作。S参数保存在SNP文件中，SNP文件是一种通用的文本格式，所有的通用电磁分析软件都支持读写。具体细节内容可百度。www.cae-sim.com提供了SNP文件查看工具，可免费下载使用。

PEC

Perfect Electronic Conductor/Condition

理想导体边界，边界条件的电场矢量垂直于物体表面。

PMC

理想的磁边界条件，这种边界条件的电场矢量和物体表面相切，磁场矢量与物体表面垂直。

ABC

Absorbing Boundary Condition

也称辐射吸收边界，系统在辐射边界处吸收了电磁波，可以把边界看成是延伸到空间无限远处。由于在高频电路中，金属一般是平行或垂直于XYZ轴（保证电磁波在边界能吸收），所以通常定义一个空气包围盒实体，该包围盒会把所有电路结构包含在内，同时把ABC定义在空气包围盒的面上。为了保证计算精度，ABC距离电路结构需要要有一定距离。

阻抗边界条件

Impedance用来模拟已知阻抗的电路性表面。由此衍生出分层阻抗边界条件（Layered Impedance）

激励

Lumped Port 和Wave Port是主流高频电磁软件两种常用的激励方式。

Lumped Port类似于传统的波端口，Lumped Port可以设置在物体模型内部，需要用户设定端口阻抗，直接在端口处计算S参数，设定的端口阻抗即为Lumped Port上的S参数的参考阻抗。

Wave Port 波端口

Wave Port一般都在边界和背景的交界处。外部端口需要通过传输线的方式才能将激励信号加入到结构中，而外部端口通常会定义成传输线的截面。Wave Port 支持端口平移，即将port平移后，不需要再仿真，只需进行简单后处理计算机即可。

单元选择问题

三维高频电路中最常用的是四面体单元，这是由于电路中工艺，传输性能等方面的原因，几何尽可能的保持简单，常用长方体，立方体，以及过孔圆柱体等；二次单元在性能，精度方面有很好的平衡，能满足大部分仿真需求。

后处理

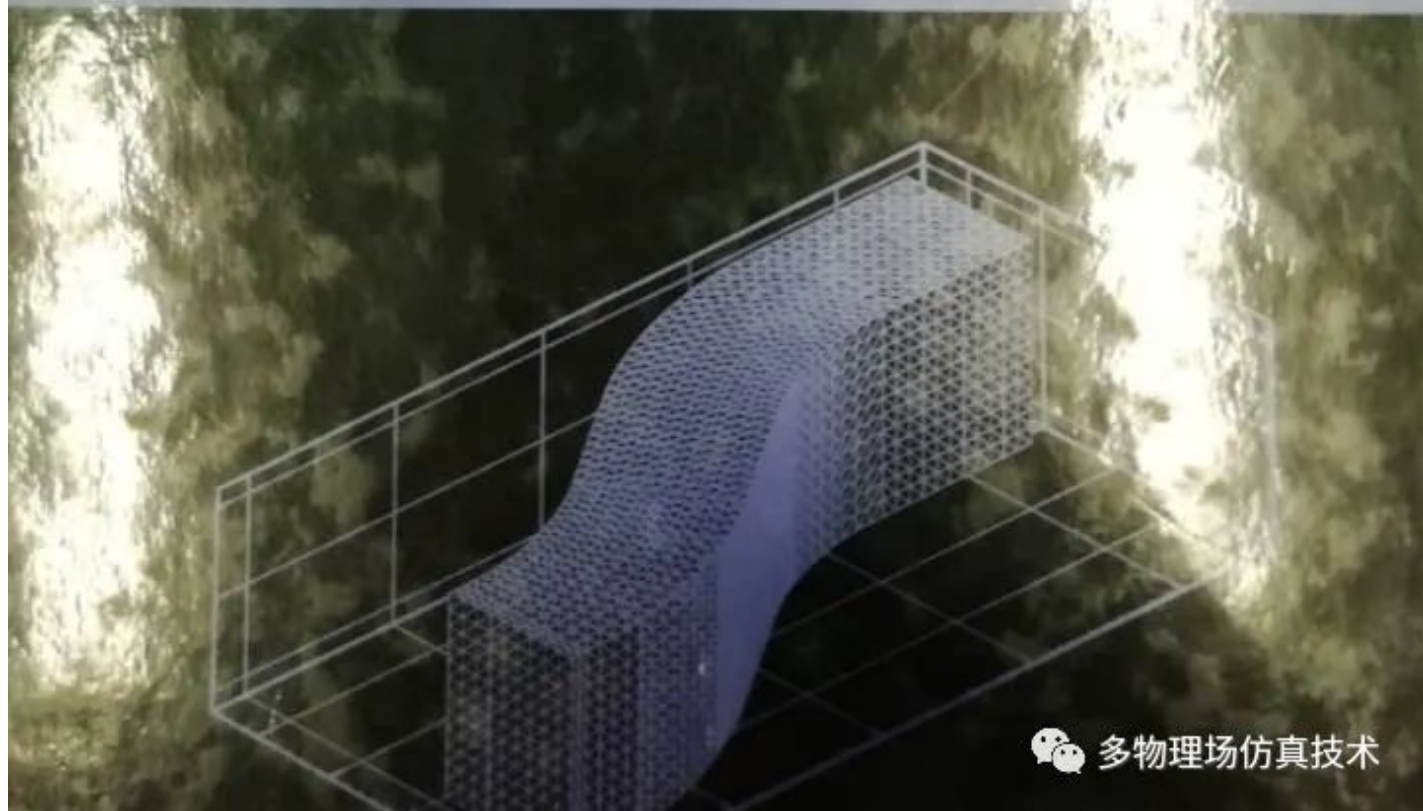
前面提到了电磁分析是三维矢量单元，自由度上保存有电磁场数据，因此在后处理中可以通过云图查看场数据的分布情况。电磁场的云图显示实现和其它物理场的显示相同。在每个单元的节点上赋给电磁场值，设置最大最小值和颜色插值格式。需要注意的是，由于使用的是三维四面体单元，数据会很多，产生性能问题，通常只需要取到表面结果数据显示即可，这样可以大幅度减少数据量，并可轻松支持动画显示。

高频电路分析比如在信号完整性，电源完整性，电磁干扰等领域涉及到大量的基础专业知识，本文仅针对软件研发测试人员的入门介绍。

The Finite Element Method in Electromagnetics

SECOND EDITION

Jianming Jin



阅读: null

在看: null