

# 基于局部三维协同仿真技术的 X 波段 窄带腔体滤波器设计

谭士杰

(中国电子科技集团公司 第九研究所, 四川绵阳 621000)

**摘要:** 从耦合矩阵出发, 建立耦合谐振型滤波器电路模型。利用 Ansoft 的 Designer 仿真软件对滤波器模型进行分析优化, 得到滤波器级间耦合系数和输入、输出端口耦合系数等滤波器电路设计参数。根据得到的滤波器电路设计参数, 应用 Ansoft 的 HFSS 软件分别建立滤波器物理级间耦合物理窗以及输入、输出端口等局部物理模型并对其进行分析优化得到所需物理尺寸参数。利用局部仿真参数建立整体滤波器仿真物理模型, 通过分析优化最终设计出符合指标要求的腔体滤波器。应用该方法设计并制作了一个中心频率 9GHz、带宽 30MHz 的腔体滤波器, 设计值与实测指标吻合很好。

**关键词:** 耦合谐振滤波器; 设计; 协同仿真; 局部仿真

中图分类号: TN713

文献标识码: B

文章编号: 1001-3830(2010)03-0067-04

## Design of X-band Narrowband Coaxial Cavity Filter Based on Local 3-D Simulation

TAN Shi-jie

Ninth Research Institute, CETC, Mianyang 621000, China

**Abstract:** A circuit model for coupling resonant-type filter was constructed from coupling matrix. Based on this model, circuit parameters such as interstage and input-output port coupling coefficient were optimized by Ansoft designer software. According to obtained circuit design parameters, local models of interstage coupling window and input-output port were established and optimized to get practical size parameters by Ansoft HFSS software. Local 3-D simulation parameters were used to construct a filter model to finish filter design. A five cavity band-pass filter with a passband of 30MHz at 9GHz was designed and fabricated in this way, with measurement results in good accordance with theoretical design.

**Key words:** coupling resonator filter; design; co-simulation; local simulation

### 1 引言

X 波段窄带腔体滤波器广泛应用于电子对抗、雷达等系统的接收机前端, 起频率预选作用。其指标好坏直接影响接收机的整体性能。传统的腔体滤波器设计方法是按响应和指标要求, 由经典公式查表求得各级间和输入输出耦合系数, 再在此基础上利用近似方法设计出滤波器物理结构尺寸。这种方式的设计精度较差, 后期调试难度大, 器件开发周

期较长。

三维全波电磁仿真软件的出现为 X 波段腔体滤波器提供了新的设计途径。然而由于 X 波段多级窄带腔体滤波器具有高频敏感性的特点, 直接利用三维电磁仿真软件进行整体分析优化设计时, 计算数据量大, 运算时间长。局部仿真技术是将电路仿真和三微电磁场仿真有机结合, 将设计参数如级间耦合系数等放在建立的电路模型中采用电路仿真予以求解。分别建立多个单元三维模型, 将电路仿真中得到的参数解作为三维模型设计初始参数, 得到相应的物理参数如耦合窗大小尺寸等。然后

收稿日期: 2010-01-11 修回日期: 2010-03-02

作者通信: E-mail: jie1609@163.com

磁性材料及器件 2010 年 6 月

万方数据

建立滤波器整体模型进一步对仿真结果分析、优化,得到最终的滤波器物理尺寸和对应的仿真指标曲线。

## 2 耦合谐振型带通滤波器电路拓扑结构及参数计算

### 2.1 耦合谐振滤波器频率变换

滤波器低通原型变换<sup>[1]</sup>是常用设计思路,比较容易理解和操作,但其过程繁琐且精确性较差,后期调试量大,很难满足目前市场对各种特制滤波器的开发周期短、批量生产大的要求。因此,本文采用的设计思路是从耦合矩阵出发,利用 $J$ 阻抗变换器建立耦合谐振型滤波器电路拓扑结构,分析计算拓扑结构中相关参数值。图1为并联型耦合谐振滤波器电路模型。图1中 $G$ 表示负载; $J_{n,n+1}$ 表示 $J$ 变换器,其值为滤波器级间耦合系数 $J_{i,i+1}$ ;  $C_{sn}$ 表示并联谐振电容,  $L_{sn}$ 表示并联谐振电感。

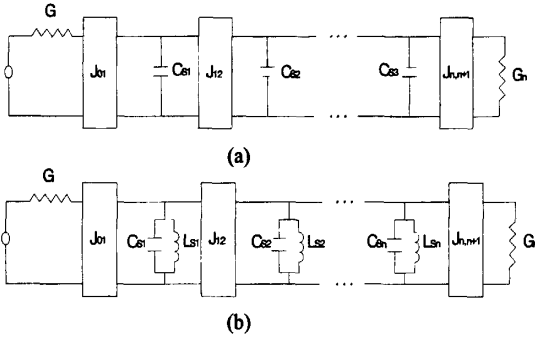


图1 耦合谐振型滤波器电路模型

将 $J$ 变换器的通用等效电路带入图1所示的耦合谐振型滤波器的电路模型。根据 Kirchhoff 环路定理,可以分别得到各个回路的电路方程。

$$\begin{bmatrix} G_0 + G + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) & j\mu_1 & & & j\mu_n \\ j\mu_1 & G_1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) & j\mu_2 & & j\mu_{n-1} \\ & j\mu_2 & G_2 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) & & \\ & & & \ddots & \\ j\mu_n & j\mu_{n-1} & & G_{n-1} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_s \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $i_n$  为电路环路电流,  $e_s$  为源电流,  $G_n$  为导纳,  $\omega_n$  为角频率。

### 2.2 耦合谐振滤波器参数计算

首先应用 (1) 式把图 1a 变换成图 1b。在图 1a 中元件  $L_{s1}$  的电抗经频率变换后应为 1b 中第  $j$  个串

联谐振器的电抗,即

$$X_j(\omega) = \omega' L_{sj} = \frac{\omega'}{W} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) L_{sj} = \omega L_{sj} - \frac{1}{\omega C_{sj}} \quad (2)$$

由此得出 
$$L_{sj} = \frac{\alpha_j L_{sj} - \alpha_j}{W \omega_0} \quad (3)$$

$$C_{sj} = \frac{W}{\alpha_j \omega_0 L_{sj}} \quad (4)$$

在这里需要定义一个电抗斜率参数<sup>[2]</sup>的概念。

其表示符号为  $\chi_i$  且有  $\chi_i = \frac{\omega_0}{2} \frac{d\chi_i(\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0}$  为第  $j$  个谐振器的电抗斜率参数, 所以有,

$$\chi_i = \frac{\omega_0}{2} \frac{d\chi_i(\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} = \omega_0 L_{sj} = \frac{1}{\omega_0 C_{sj}} \quad (5)$$

通常设计耦合谐振型带通滤波器不是用它的阻抗变换器,而是用它的两终端的外界  $Q$  值和谐振器间的耦合系数。可以证明终端外界  $Q$  值是:

$$\left. \begin{aligned} (Q_C)_A &= \frac{\chi_1}{K_{01}^2 / R_A} = \frac{g_0 g_1 \alpha_1}{W} \\ (Q_C)_B &= \frac{\chi_n}{K_{n,n+1}^2 / R_B} = \frac{g_n g_{n+1} \alpha_n}{W} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

中间任意两个相邻谐振器间的耦合系数  $k_{i,i+1}$ , 它的定义是两相邻谐振器间的耦合阻抗  $K_{i,i+1}$  与它们的感抗的几何平均值  $\sqrt{\chi_i \chi_{i+1}}$  之比, 即

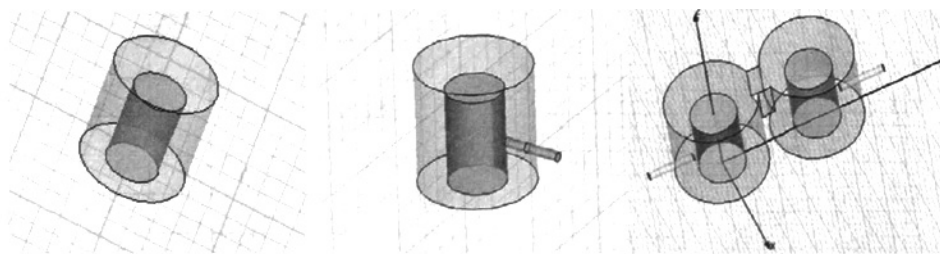
$$K_{i,i+1} = \frac{k_{i,i+1}}{\sqrt{\chi_i \chi_{i+1}}} = \frac{W}{\omega' \sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (7)$$

## 3 滤波器协同仿真分析与设计

### 3.1 协同仿真技术基本理论

对于微波分布参数滤波器,其物理尺寸直接影响着电气参数,决定了滤波器的性能。因此建立滤波器的物理模型<sup>[3]</sup>,得出确定的物理尺寸是滤波器设计的重要环节。传统的软件设计方法是应用平面二维仿真软件建立整体拓扑电路图,通过分析和优化得到一组整体的滤波器各参数值,然后根据耦合矩阵和谐振回路电气参数,建立一个整体的腔体滤波器模型。应用 HFSS 等电磁场仿真软件对其进行三维全波分析和优化,得到最终的腔体滤波器物理结构尺寸。

上述设计方法有以下问题。由于在得到电气原理拓扑图后建立的是一个整体的腔体滤波器物理模型,三维全波分析的对象也是针对腔体滤波器整



(a) 单谐振腔仿真模型 (b) 滤波器输入输出端仿真模型 (c) 两腔耦合仿真模型

图2 腔体滤波器局部三维物理仿真模型

体进行的, 因此软件将建立整个结构的有限元网格, 造成建立的有限元网格数量巨大, 导致计算量迅速增加, 大大延长了运算时间。这样在工程应用上, 通过应用仿真软件来进行窄带腔体设计在效率上与传统经验、查表设计方法无明显优势。

因此在这里我们提出, 应用软件建立电路拓扑图。优化分析得出各电抗参数后, 分别建立单谐振腔、输入输出端和两腔耦合的滤波器局部三微模型, 对以上模型逐一进行全波分析和优化得到各自最优物理模型, 在此基础上建立整体物理模型进行最终的局部调整。

实际应用中的微波无源器件通常可分解为一系列通用的基本单元, 如 H 面双膜片、矩形波导阶梯、圆波导阶梯等。将整体结构划分为不同部分后, 各个不同部分可单独分析, 并在相应的端口处连接, 利用广义散射矩阵级联技术可获得基本单元的广义散射矩阵。端口处单模的解对应了一个传播常数和由电场、磁场分量共同决定的特性阻抗。散射参数可完全表征划分为黑盒的三维结构特性, 需要注意的是应用散射参数级联的方法, 要保证场量匹配于端口处的边界条件。

对由同轴腔构成的腔体滤波器, 可将其分解为本振频率腔、输入输出耦合、谐振腔级间耦合等多个部分, 并对每个结构部分用全波分析的方法求解, 然后级联广义散射参数, 求取整个模型的散射参数。因此, 从本质上讲, 上述分析方法的理论基础是广义散射矩阵的级联。

基于以上理论分析, 本文应用协同仿真技术对 X 波段窄带腔体滤波器进行仿真、优化设计。

### 3.2 协同仿真设计方法

首先根据要分析的滤波器结构划分为不同的设计单元建模, 建模时要以电磁场分布的对称性为主要原则, 同时要兼顾结构的对称性。

在 Designer 中, 进行子电路分析, 可将子电路的类型选择为 HFSS, 这样可实现两者的协同仿

真。但应先在 HFSS 中建立模型并进行仿真。由 HFSS 生成的 S 参数文件可导入到 Designer 中的电路仿真软件中。在电路模型中, 这些模块被抽象成多端口网络。将各个部分按次序联结一起, 在电路模型中进行综合仿真。

根据同轴腔体滤波器的电磁分布和结构特点, 本文将其分为本振频率腔、输入输出耦合、谐振腔级间耦合等三个部分, 在 HFSS 电磁场软件中分别建立如图 2 所示的三个部分的物理模型。

图 2 a 为单谐振腔仿真模型, 通过对该模型进行本振频率仿真计算可确定单腔尺寸。图 2 b 为滤波器有载 Q 值计算模型。该模型中一个耦合针与谐振杆的联合体放置在一个闭合的金属腔内, 为了进行本征模分析, 这个模型必须终止于一个吸收性材料的良好匹配层 (PML), 同时该模型需和实际的滤波器具有相同的长度和前后厚度。图 2 c 是确定滤波器级间窗大小和耦合系数 K 值之间关系的模型。两谐振杆被放置在一个闭合的金属腔中, 这个金属腔具有和实际滤波器相同的尺寸。两个单腔之间是两节 4mm 厚的金属壁, 通过调节两个金属壁的尺寸来调整两腔的耦合大小。在材料设置中, 谐振杆可以设置为良导体, 腔体由空气填充。将腔体边界条件设置为 Perfect-E。

然后将这些模型导入 desinger 电路设计软件中。在电路形式下, 每个部分被抽象为一个多端口器件, 这些电磁结构模型被导入到电路模块中仍保持其独立性, 将这些多端口器件按逻辑关系联结起来组成一个电路模型, 如图 3 所示。

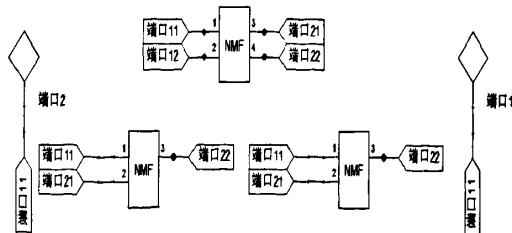


图3 电路端口连接模型

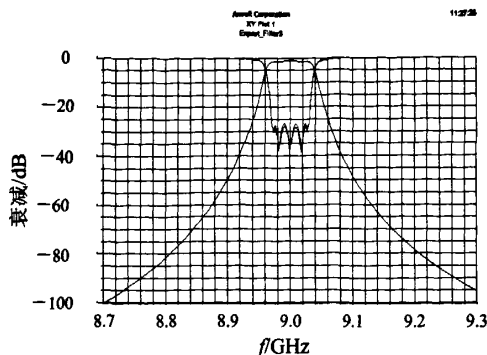


图4 局部仿真曲线

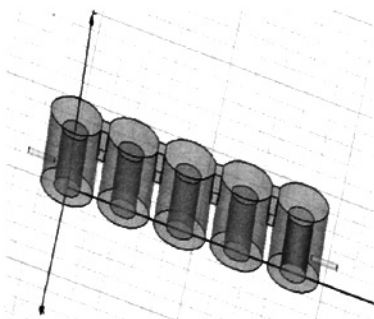


图5 腔体滤波器整体仿真模型

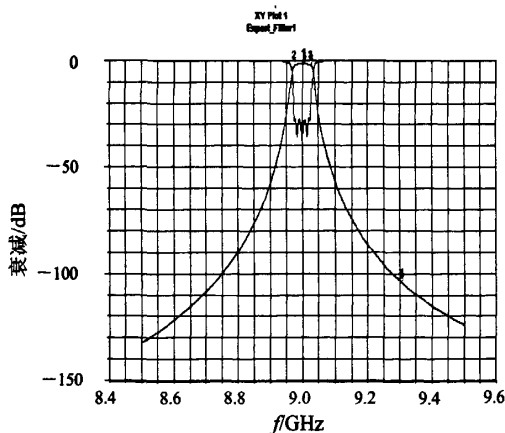


图6 腔体滤波器整体仿真曲线

通过对电路连接模型的二维仿真分析,多次调整物理模型参数,得到了如图4所示局部仿真物理模型对应的频率特性曲线。

在仿真曲线与设计指标大致接近的基础上,图5为依据局部物理尺寸在HFSS中建立所示的腔体滤波器整体模型。然后对其个别敏感部位参数进行微调。最终得到满足要求的仿真结果,如图6所示。

### 3.3 设计实例

基于以上设计方法,本文实际设计了一款X波段腔体滤波器,其设计指标为:

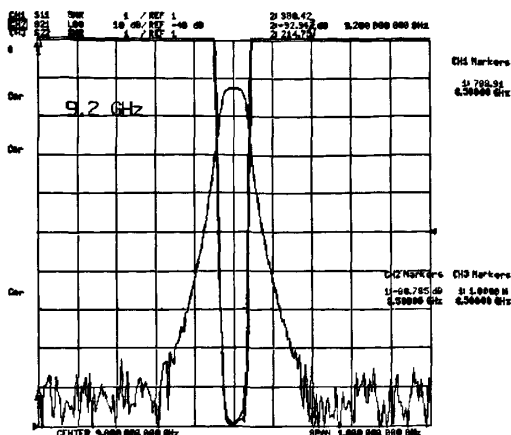


图7 滤波器指标测试曲线

中心频率为:  $f_0=9000\text{MHz}$ ;  
3dB 工作带宽:  $\geq 30\text{MHz}$ ;  
带外抑制:  $\geq 70\text{dB}$  ( $f_0\pm 500\text{MHz}$ )。

图6是对建立的仿真物理模型进行分析优化后得到的理论计算曲线。图7是根据理论物理模型的尺寸加工调试的实际滤波器指标测试曲线。可以看出二者吻合得很好。

### 3.4 讨论

(1)从分析仿真的时间效率看,分别建立、分析和优化单谐振腔模型、输入输出端模型和两腔耦合模型及最终整体优化的总时间较一次性建立整体模型然后进行分析、优化的时间缩短了近50%。这是由于分步建模、分析有效地利用了滤波器在结构上的对称性,减少需建立的有限元网格数,从而大大降低了运算量,提高了仿真效率。

(2)从仿真结果看,仿真曲线与基于仿真物理模型尺寸加工的实物样品的测试曲线吻合得相当好。这充分说明基于这种协同仿真技术设计出的滤波器具有很高的可生产性。

### 4 结束语

从仿真结果和实际样品比较可以看到,通过采用二维平面电路和部分结构三维全波协同仿真分析技术,设计出的滤波器仿真结果和样品实测结果吻合度很高,缩短了设计周期,提升了产品的研发效率。

### 参考文献:

- [1] 甘本拔, 吴万春 现代微波滤波器[M]. 北京:科学出版社, 1973.198-240.

(下转 77 页)

究中医，认为气是血液循环的原动力，是解决现代病的重点。现代病绝大多数是循环系统疾病，是功能性疾病。一个汽车某零件坏了，汽车还在，但开不动了，功能出了问题，通过改善功能，使汽车重新开动起来。我们的老祖先在定义“气”的时候也采取功能性定义，例如肝气就是增加肝功能的那个东西，肾气就是增加肾功能的那个东西。中医又把气细分为元气、宗气、营气、卫气四种。中医理论中的元气，就指命门之气，也称“中气”，走三焦包含整个循环系统。“中气”不足乃指心脏功能不佳，元气从心脏而来。宗气由肺而来，营气由脾胃运化水谷而来，卫气运行于脉外，就是你的抵抗力，卫气充足则免疫功能强。从机理上讲，我认为几种气都来自同一种东西——ATP，都是由营养物质加上氧气而产生的能量，只是通过不同器官后表现出不同的功能，有的推动血液循环，有的提供营养，有的用于防卫，就像同样是一种面粉，经过不同工艺，可加工出不同种类的食品一样。

线粒体在将营养转化为能量的过程中，辅酶Q10起重要作用，它能使细胞保持良好的状态。它是人和动物脏器组织中普遍存在的一种生命活动所必需的物质，由人体自主合成。20岁时含量达最高峰，80岁时只相当20岁时的一半，所以老年人体质较弱。人体含有酶约5000种，肠道细菌可合成3000种，其余2000种要从食物中摄取，西红柿、食用仙人掌、海带、小葱、莲子芯中富含抗衰老酶或其激活物质，所以应经常食用。

“邪气”是什么？是寒气，是负能量，象天体中的暗物质，专门吸收能量。若进入人体的寒气太重，会使体液变质，我们知道体液中有粘蛋白，蛋白质变性后就不能再被利用，成为无用的垃圾堆积在体内，留在哪个经络里就产生哪个经络的疾病，要想法排除才好。《素问》里有一篇专门讨论“疼痛”的文章叫“举痛论”。这一篇里举了十多个疼痛的例子，除一例外，都是讲寒气致痛。可见驱寒的重要性。

中国中医药大学曲黎敏教授<sup>[6]</sup>认为，“元气”是

父母所给先天之气，肾是“元气”的仓库，还主管“元气”的运用，肾的力量强不强要看腰子（肾）上包的油多不多，那个油就是髓，可惜没人去分析那块油有什么特别之处，我想既然是脂肪，也应转化为ATP。最后，谈谈钙库问题，费伦教授在试验中发现，在穴位的深层组织存在着钙库。钙离子对生物电磁学来说是最感兴趣的离子，因为它对电磁场最敏感，用处也最多。在肌肉收缩中 $\text{Ca}^{2+}$ 在肌动蛋白和肌球蛋白间搭桥，使它们收缩在一起。因为在四肢、手、脚、和手指、脚趾关节两边，穴位分布很多，这是因为关节经常活动，使它们收缩就需要钙离子，所以，在这里存在钙库是必然的。

在书中谈到在极低频电磁场存在着钙离子的“窗口”效应，即在16Hz时，猫脑、鸡脑出现钙离子流出最大值现象，即出现了非线性（放大）现象，这是因为 $\text{Ca}^{2+}$ 在细胞外浓度为 $2 \times 10^{-3}\text{M}$ ，而在细胞内浓度为 $10^{-7}\text{M}$ ，相差很大。微量钙离子的流入、流出，对与钙有关的酶激活影响很大，钙起着“扳机”的作用。

钙离子的内流是引起神经末梢神经递质释放的关键环节，细胞内 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度有少量变化，就可使神经递质的量子释放数变化很大，有效地触发和中止内分泌活动。

以上就是我从电磁角度对经络的思考，我认为，当一个简单解释足够时，你就不应当使问题复杂化，大道至简。

#### 参考文献：

- [1] 祝总驷，郝金凯，等. 针灸经络生物物理学[M]. 北京：北京出版社，1985.402
- [2] 费伦，等. 经络物质基础及功能性特征的实验探索和研究展望[J]. 科学通报，1983，33（6）：658
- [3] Becrer R O. Cross currents: the promise of electromedicine ,the perils of electropollution[M]. New York: Martin's press, 1990. 47
- [4] 巴巴拉·科纳维，等（张爱学等译）. 人体能场的存在及其功能的历史记述[J]. 自然杂志，1981，4(11): 831
- [5] 王唯工. 气的乐章[M]. 北京：中国人民大学出版社，2006.9
- [6] 曲黎敏. 曲黎敏养生智慧精华集[M]. 厦门：鹭江出版社，2008.269

（上接70页）

- [2] Cohns B. [J]. IEEE Trans Microwave Theory 1968,16:218-227.
- [3] 谢拥军，王鹏. Ansoft HFSS 基础及应用[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2007.20-78.

作者简介：谭士杰(1981—)，男，助理工程师，主要从事微波器件、组件的研究工作。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>