

# 应用 HFSS 设计 40 MHz 腔体滤波器

王清芬, 马延爽

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘要** 应用 HFSS 仿真软件设计了 40 MHz 的腔体滤波器, 由腔间耦合系数和外界  $Q$  值的理论值, 应用 HFSS 软件进行电磁仿真, 得到腔体和耦合结构的实际结构初值, 然后进行整体仿真和优化, 完成整个设计。由于应用了仿真软件, 使得设计简单, 提高了成功率, 解决了腔体滤波器在 VHF 频段频率低、功率大的设计难题。这种软件设计方法具有很强的通用性, 结构形式也可灵活多样, 如采用了特殊的“伞状”层加载结构, 大大缩小了滤波器的体积。

**关键词** 腔体滤波器; 耦合系数; 外界  $Q$  值; 层加载结构; HFSS

中图分类号 TN454 文献标识码 A 文章编号 1003-3106(2008)12-0044-03

## Design of 40 MHz Resonator Filter with HFSS

WANG Qing-fen, MA Yan-shuang

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

**Abstract** This article designs a 40 MHz filter with HFSS. Simulating with HFSS, we can get the practical coupling structure while knowing the ideal coupling coefficient between resonators and the external  $Q$  value. Then by optimizing the whole filter, we can obtain the final design. The use of simulation software can simplify the design, improve accuracy and success rate. Moreover, we can settle the difficulty in designing bandpass filter at this frequency which can endure high power. Besides the universal applicability, the configuration can be various. According to this example at 40 MHz, the article puts forward a special cascaded structure, reducing significantly the size of the filter.

**Key words** bandpass filter; coupling; coefficient; external  $Q$  value; cascaded structure; HFSS

### 0 引言

目前, 电子信息产业发展迅速, 频率拥挤日趋严重, 对频率的分隔要求也越来越高。微波滤波器的应用也越来越受到广泛关注, 对设计也提出了更高的要求。如果还按照传统的网络综合法进行设计, 速度、效率和设计的准确性已经跟不上时代的发展, 而这些方法掌握起来, 也是十分繁琐和困难的。近年来各种三维电磁仿真软件的商业化发展, 一系列象 HFSS 这样的可以达到准确计算的软件不断涌现, 飞速发展的计算机技术也使得这类软件的计算速度大大提高, 在滤波器的设计仿真和实现中发挥着巨大的作用, 使设计水平进入到一个数值化时代。对于本文所述 40 MHz 低频率大功率的腔体滤波器来说, 如果按照传统的方法进行设计, 尺寸大、周期长、成本高是不可回避的问题, 但应用 HFSS 仿真软件进行拟合, 就可以达到很好的效果。

### 1 软件应用

#### 1.1 三维电磁场软件的发展

三维电磁场的求解, 传统的方法是根据实际的

边界问题求解麦克斯韦方程组, 得出  $\vec{E}(\vec{r})$  和  $\vec{H}(\vec{r})$  的三维表达式, 如果是典型的简单边界, 那么解也是准确的, 如几种常用传输线内部的电磁场表达式, 但在实际应用中, 很多时候边界条件复杂, 求解困难甚至无法求解。

直到近期, 发展起来的数值法与计算机技术的结合, 才使得复杂边界的电磁场问题的求解成为可能。数值法主要包括矩量法、有限元法、边界元法和有限时域法。

根据上述计算电磁场的数值法理论发展起来的设计软件种类繁多, 如: HP-Eesof ADS、AWR Microwave Office、Ansoft HFSS、Waspnet、Mician 和 CST 等, 它们有各自的使用范围和优势, 在不同情况下, 采用不同的计算方法。使微波滤波器的设计和实现发展到了一个新的时代。

在实际的应用过程中, 最具代表性的应属 HFSS。其分析计算的理论基础就是数值法中的有限元法, 其有限的划分单元是三棱体, 通过它的自适应网格技术和强大的图形界面, 从理论上来说它可

收稿日期: 2008-06-19

以解决几乎所有的3D问题,如S参数,谐振频率和任意点的电磁场大小等。并且它具有完善的优化功能,设置合适的优化目标,就能自动达到满意的设计结果。

## 1.2 HFSS设计腔体滤波器

用HFSS设计腔体滤波器一般分为以下步骤:

① 通过HFSS单腔模型仿真来确定谐振腔、加载情况,使得单腔本征模频率在所需值附近;

② 通过HFSS两腔模型本征模仿真确定腔间耦合结构的形状和尺寸;

③ 通过HFSS单腔加激励端口确定输入输出耦合的形式和大小;

④ 综上,建立整体模型,并进行优化仿真,得到最终的设计。

在进行建模仿真之前,需要进行计算。通过滤波器设计理论、经验以及所需滤波器的使用频段,承受功率、重量和体积等来确定合适的腔体大小、腔数并得到腔间耦合系数和外界Q值的理论值。

### 1.2.1 外界Q值

它的理论值可以用如下公式得到:

$$Q_e = g_0 g_1 / W \text{ 或 } Q_e = g_n g_{n+1} / W. \quad (1)$$

式中, $W$ 为带通滤波器的相对带宽; $g_0, g_1, g_n, g_{n+1}$ 为归一化低通元件值。

要得到上述外界Q值的结构数据,就需用HFSS仿真:

$$Q_e = f_0 \tau_{\max} / 4. \quad (2)$$

式中, $\tau_{\max}$ 为单端输入,单个谐振腔的群时延的最大峰值; $f_0$ 为 $\tau_{\max}$ 对应的谐振频率。

### 1.2.2 腔间耦合系数

腔间耦合系数的理论值为:

$$k_{i,i+1} = W / \sqrt{g_i g_{i+1}}. \quad (3)$$

式中, $W$ 为带通滤波器的相对带宽; $g_i, g_{i+1}$ 为归一化的低通元件值( $i=1, 2, 3 \dots n$ );耦合系数 $k_{i,i+1}$ ,需要通过HFSS仿真,得到合适的结构形状和尺寸,计算公式为:

$$k_{i,i+1} = (f_2^2 - f_1^2) / (f_2^2 + f_1^2). \quad (4)$$

式中, $f_1, f_2$ 为双腔本征模仿真时2种模式的频率值(设定 $f_2 > f_1$ )。

根据选定腔体结构,运用本征模仿真,可以得到

2个模式的频率值,代入式(4),当得到的值与式(3)的理论值逼近或相等时,便可以认为此结构的大小就是所需要的值。

### 1.2.3 各谐振腔的结构初值

滤波器的整体仿真时,各谐振腔的结构初值可以采用耦合系数本征模仿真以及外界Q值仿真时对应的值。如果是窄带调谐滤波器(3%以内),上述值就可以作为最终尺寸;如果带宽在5%以上,要达到免调谐的目的,每个谐振腔的准确值,需要通过整体的仿真优化最终确定。

使用HFSS进行仿真设计与经典的设计方法相比,适用的范围宽,结构选择灵活多样,而且它的仿真结果与实际的结果非常吻合,当工艺精度达到要求时,计算结果可以直接用于加工,缩短了研制周期,大大减低了材料成本、人力消耗。一旦掌握还会大大降低设计难度,使腔体滤波器的设计水平得到质的飞跃。

## 2 设计实例

本实例的中心频率40 MHz,相对带宽2.5%,带内驻波比1.3,它的特点是频率低,承受功率大,并且体积要求相对要小。如果采用传统的方法,就要求有足够的理论基础和实践经验,选择合适的腔体,由经典公式近似计算的腔间耦合孔的大小,经过多次加工样机,反复调整耦合窗和输入输出耦合的大小,最终才能得到需要的结果。它的准确度以及从研制到生产的周期无法预计。而现在用HFSS进行仿真,很快就得到比较满意的结果。

具体的设计步骤如下:

① 根据指标选择腔数 $n=6$ ,根据基本滤波器综合理论和式(1),式(3)得到耦合系数和外界Q值的理论值: $Q_e = 31.187$ ;  $k_{12} = 0.02425 = k_{56}$ ;  $k_{23} = 0.0165 = k_{45}$ ;  $k_{34} = 0.0155$ ;

② 选择腔体,用HFSS仿真计算本征频率。对于40 MHz的中心频率,如果直接选用1/4波长形式,内导体长度约为1875 mm,外形尺寸过大,实用性必然大打折扣;而且传统的设计方法也无法得到直观的功率强度的数据。现在用HFSS建模,内导体采用“伞状”层加载结构,如图1(a)所示。进行本征模仿真得到40 MHz时的腔体结构的参考值;

③ 根据HFSS仿真计算腔间耦合结构,耦合结

构采用中间开窗型。这时,腔体选择如②,仅调整最上层加载片和腔间耦合孔的高度,得到需要的值;

④ 由 HFSS 仿真计算输入输出耦合。如图 1(b) 所示,在单腔本征模的基础上加一激励端口,用 driven 模式进行仿真。本例选择抽头激励形式。调整抽头与短路端的距离,由式(2)得到所需的值;

⑤ 通过 HFSS 整体建模,并优化仿真。滤波器剖面图如图 2 所示。

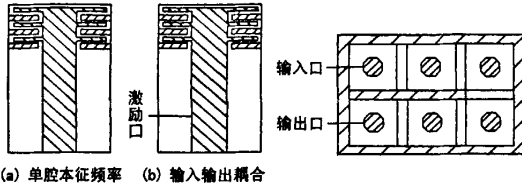


图 1 腔体及输入输出仿真 图 2 滤波器剖面图

具体尺寸为:腔体  $\phi 150$ ,高度 200,内导体  $\phi 45$ ;加载片厚度 2,加载部分所有内外导体的间隙均为 3。所有腔体一二层加载片  $\phi 144$ ,第一腔的最上层加载片直径为 145.7,其他最上层加载片直径为 138;第 1、2 腔间的耦合窗口大小为  $150 \times 6 \times 76.5$ ,第 2、3 腔之间的耦合窗口大小为  $150 \times 6 \times 44.3$ ,第 3、4 腔之间的耦合窗口大小为  $140 \times 15 \times 58$ 。抽头  $\phi 1$  镀银线,抽头位置距短路端 63。滤波器两边对称(单位:mm)。

整体优化后第一腔最上层加载片为  $\phi 142.8$ ,抽头位置距短路端 62.7。仿真结果如图 3 所示。

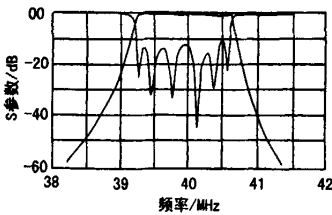


图 3 滤波器仿真结果

由图 3 可看到仿真结果近似满足设计指标。 $f_0 = 39.7$  MHz,相对带宽为 2.85%,与实际要求略有差别,但基本符合要求。由于需要的相对带宽比较小,且滤波器体积较大,需要划分的网格要细、要多。因此要想得到比较理想的带内驻波,第一目前的计算机能力不够,第二所需运算时间过长。而对于可

调谐滤波器这个问题可以通过调试的方式解决。对于本例实测结果较为满意,与仿真吻合很好。

### 3 结束语

综上所述,在 VHF 频段(如本例 40 MHz),利用 HFSS 软件进行仿真计算,通过特殊的“伞状”层加载结构,由腔间耦合系数和外界  $Q$  值,在较短的时间内设计了以前没能实现的腔体带通滤波器,不仅解决了工程难题,提高了效率,更为以后的滤波器设计打下了坚实的基础。而且经过多个工程的实际验证,用三维仿真软件进行设计的其他形式的滤波器,也取得了很好的效果。使用它们的优化功能,可得到更加精确的设计,带宽 5% 以上时,甚至可以做到免调谐,解决了设计微波滤波器的关键问题之一。给现代腔体滤波器的设计带来了新的发展,具有很大的应用空间 and 经济效益。

#### 参考文献

- [1] 甘本拔,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计[M].北京:科学出版社,1973.
- [2] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York: John Wiley&Sons. Inc, 2001.
- [3] 王清芬,马延爽.耦合系数法设计微波带通滤波器及 CAD 实现[J].无线电通信技术,2008,34(1):43-44.

#### 作者简介

王清芬 女,(1979-),中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师。主要方向研究:微波散射通信。

### 欢迎投稿

《无线电工程》期刊是全国中文核心期刊,中国期刊全文数据库全文收录期刊,中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊和万方数据资源系统数字化期刊群入网期刊,中文科技期刊数据库全文收录期刊。曾多次荣获信息产业部优秀电子科技期刊,河北省新闻出版局、河北省版权局年度全省报刊版权工作先进单位,属国家重点检索刊物。

本刊主要刊登内容为:国家基金项目论文、博士(硕士)学位论文,研究与报道信息系统与网络、信号与信息处理、测控遥感与导航定位、电磁场与微波、专题技术与工程应用领域的最新科技成果与前沿技术,技术与市场紧密结合;欢迎广大科技人员踊跃投稿,本刊将竭诚为您服务。

联系电话:0311-86924962,86924964

传真:0311-83628044

E-mail:geh@mail.cti.ac.cn

## HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>



### 更多 HFSS 视频培训课程:

#### ● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

#### ● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

#### ● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

#### ● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

## 关于易迪拓培训:

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,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计相关培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>