

# 基于 HFSS 的微调谐腔体带通滤波器设计

曲永志,李德志,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:**针对微调谐腔体带通滤波器设计制造中存在的问题,介绍了腔体带通滤波器的总体设计;论述了需要解决的问题,如优化计算、提高仿真精度和简化调谐结构,并对二端口网络等效替换、整体仿真和微调谐关键技术进行了分析;最后阐述了仿真与性能测试结果分析,测试结果分析说明微调谐腔体带通滤波器设计精确且拥有很好的应用前景。

**关键词:**腔体带通滤波器;微调谐;免调谐;HFSS

中图分类号: TN454

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2012)03-62-3

## Design of Fine-tuning Cavity Bandpass Filter Based on HFSS

QU Yong-zhi, LI De-zhi, MA Yan-shuang

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

**Abstract:** For problems in the design process of fine-tuning cavity bandpass filter, first, the overall design of cavity bandpass filter is introduced. Then, some problems to be addressed such as optimizing the calculation, improving the simulation accuracy and simplifying the tuning structure are discussed. And some key technologies are analyzed for example, equivalent replacement of two-port network circuits, overall simulation and fine-tuning structure. At last, simulation and test results of properties are analyzed, proving that the fine-tuning cavity bandpass filter is designed accurately and has a good application prospect.

**Key words:** accurate simulation; micro-tuning; tuning-free; HFSS

### 0 引言

传统的微波腔体带通滤波器的设计过程中,参数计算量大,仿真存在误差,调谐过程耗时费力。随着腔体带通滤波器在微波通信设备中的广泛应用,其设计方法有待改进。

通过设计参数求取方法的改进和对原理图的完善补充以及采用合理的仿真过程,确保了滤波器设计的精确度。在此基础上,摒弃传统的用调谐螺钉调谐的方式,采用微调谐结构的腔体来实现滤波器的微调谐,配合线切割加工工艺,最终实现腔体带通滤波器的精确微调谐设计,一定的相对带宽条件下,可实现免调谐设计。

### 1 总体设计

微波腔体带通滤波器的设计过程大体分为 3 步:①按设计要求求取设计参数;②进行滤波器模型的仿真;③进行滤波器的调谐。

求取设计参数一般先根据设计要求选择合适的切比雪夫低通原型滤波器,因为较之最大平坦型滤波器,切比雪夫滤波器有更优异的带外抑制,较之椭圆函数滤波器更易于实现。切比雪夫低通原型电原理图如图 1 所示。

圆函数滤波器更易于实现。切比雪夫低通原型电原理图如图 1 所示。

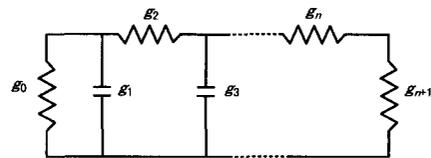


图 1 低通原型原理图

通过引入导纳变换器,将低通原型变换为只有一种电抗元件的形式<sup>[1]</sup>,然后对其进行归一化和参数变换,转化为图 2 所示的带通滤波器的形式。

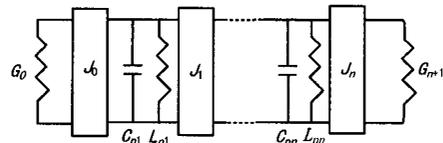


图 2 理想带通滤波器原理图

其中,导纳变换器的值可用下式表示:

$$J_n = Bw / \sqrt{g_i g_{i+1}}, \quad (1)$$

式中,  $Bw$  为带通滤波器相对带宽,

$$Bw = (\omega_2 - \omega_1) / \sqrt{\omega_1 \omega_2}, \quad (2)$$

式中,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  是带通滤波器的通带的上下截止角频率。

进行模型仿真前,还需要得到以下 3 个参数:

收稿日期:2012-02-23

作者简介:曲永志(1983-),男,工程师。主要研究方向:微波散射通信。

- ① 单端输入最大群时延; ② 谐振器间耦合系数;  
③ 谐振腔的谐振频率<sup>[2]</sup>。

滤波器模型的仿真分为 2 步: 第一步要在 HFSS 中建立滤波器的三维微调谐模型; 第二步就是进行 HFSS 的模型仿真。在 HFSS 中建立滤波器腔体模型后, 对其先后进行单谐振器本征模仿真、双谐振器本征模仿真和单端输入最大群时延仿真, 分别得到单谐振器谐振频率、相邻谐振器间耦合系数和单端输入最大群时延等参数的仿真值。然后, 利用仿真值去逼近对应参数的理论值, 得到最终的模型尺寸。

模型仿真结束后就可以按仿真尺寸对滤波器进行机加工, 最后经过调谐, 滤波器就可以达到使用要求了。

## 2 需要解决的问题

### 2.1 优化计算, 去除累计误差

求取滤波器设计参数重要的是求取导纳变换器的值, 在从切比雪夫低通原型到只有一种电抗元件的低通原型的转换过程中, 通过对传统的对偶电路<sup>[3,4]</sup>进行分析而得到的如式(3)和式(4)所示的递推形式:

$$J_{01} = \sqrt{G_0 C_{01} / (g_0 g_1)}, \quad (3)$$

$$J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{G_{n+1} C_{an}}{g_n g_{n+1}}}. \quad (4)$$

然后通过下面的频率变换公式(5)将低通滤波器变换成带通的滤波器形式。

$$w' = w'_1 (w/w_0 - w_0/w) / Bw, \quad (5)$$

式中,  $w'_1$  为原型低通滤波器的截止频率;  $w'$  为原型低通滤波器的频率轴;  $w_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$  是经过频率变换后的带通滤波器通带中心频率。

经过上面复杂的变换后, 最终得到重要的导纳变换器的值, 它是求取空间耦合系数的基础, 如式(2)所示。然而, 这一过程计算繁杂且极易出错, 给滤波器的设计带来了较大的难度, 尤其是面对原理图与公式的频繁变换, 让许多设计者知难而退。

### 2.2 提高仿真精度

三维电磁场仿真软件 HFSS 由于本身采用的是有限元数值算法, 相对于矩量法和积分法来说, 具有较高的仿真精度, 但是由于设计者采用不合理的仿真方法, 导致设计中存在仿真误差。

对于谐振器间耦合系数的仿真, 传统的方法是建立孤立双谐振器模型进行谐振器之间耦合系数的仿真, 根据仿真数据建立相邻谐振器间耦合系数对应孤立双谐振器间距的曲线, 再依据此曲线确定每个孤立双谐振器之间的距离, 最后将各个孤立双谐

振器单元进行组合得到整个腔体滤波器模型, 多谐振器组合后之间的相互影响, 可能导致滤波器响应的变坏, 严重影响到滤波器仿真的精度。

### 2.3 简化调谐结构

腔体滤波器的结构设计中使用了大量的调谐螺钉, 或在盖板上安装调谐螺钉, 或在盒体侧壁上安装, 与此同时还需要考虑相应螺母的尺寸及调谐完成后如何固定螺母的问题。调谐螺钉的使用导致滤波器结构复杂且体积庞大。

同时还存在一个更重要的问题, 即滤波器调谐的好坏、快慢很大程度上依赖于调谐者的经验与技术水平, 且产品的一致性不是很好, 这严重限制了腔体滤波器的批量生产。

## 3 关键技术

### 3.1 二端口网络等效替换技术

二端口网络等效替换技术是在从切比雪夫低通原型到只有一种电抗元件低通原型的变换过程中, 摒弃利用对偶电路求取  $J$  值的方法, 采用二端口网络电路直接等效替换的方法将低通原型中的串联电感变换成并联电容<sup>[5,6]</sup>, 低通原型中的电容值保持不变, 经过变换后的并联电容值与低通原型中的串联电感的电抗值保持一致, 此时, 并联电容两端加载导纳变化器的二端口网络的  $A$  矩阵参数与低通原型中的串联电感的二端口网络的  $A$  矩阵参数相等, 而导纳变化器的值也不再是复杂的递推形式, 其  $A$  矩阵系数是如式(6)所示的形式。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/J \\ J & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

二端口网络等效替换技术不仅优化了导纳变化器  $J$  值的计算过程, 使之简洁准确。更重要的是在此基础上, 可以直接对滤波器在原理图上进行参数变换, 得到最终的参数而摆脱繁杂的频率变换公式。

### 3.2 整体模型仿真技术

整体模型仿真技术: 首先建立滤波器整体模型, 在整体模型的框架内先对单谐振器本征模仿真求得每个谐振杆的尺寸与加载情况, 再对双谐振器本征模仿真求得相邻谐振杆的间距。2 种模式仿真都采用从中心谐振器单元到两端谐振器单元的仿真顺序。同时为了减小双谐振器本征模仿真与单谐振器本征模仿真之间的相互影响, 需要这 2 种仿真交替进行几次, 直至 2 种模式仿真的相互影响比较细微时, 最后再进行单端输入最大群时延的仿真。这样从整体模型的能有效提高仿真的精确度;

### 3.3 微调谐技术

微调谐技术是在腔体结构设计中摒弃了在谐振

器与耦合窗口处使用调谐螺钉的调谐结构,而使用如图3所示的微调谐腔体带通滤波器的谐振腔结构,结构简单且体积减半。

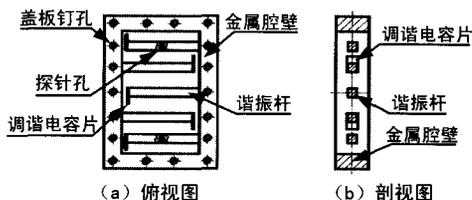


图3 微调谐滤波器谐振腔结构

谐振杆一端与地短路,一端开路,开路端加载一薄金属片,金属片呈现的是电容的特性,通过小幅度拨动金属片改变金属片与金属腔壁间的距离来实现滤波器的微调故而又称金属片为调谐电容片;输入输出端中间的过孔用于焊接穿墙玻璃绝缘子的探针,称之为探针孔;谐振杆模拟的是并联谐振电路。

### 4 仿真与性能测试结果分析

#### 4.1 仿真

设计要求:中心频率为4.7 GHz,通频带相对带宽为16%,3.5 GHz和6 GHz处的抑制度达到30 dB,插入损耗小于1 dB。

首先根据带外抑制度选择5腔结构;再求取谐振器间耦合系数,单端输入最大群时延和谐振腔的谐振频率分别如下: $k_{1,2} = 0.19937$ ,  $k_{2,3} = 0.1421$ ,  $\tau_{max} = 0.5443$ ,  $F_0 = 4.673.3$ ,  $F_0$ 是 $W_0$ 对应的频率值。然后在HFSS中建立三维微调谐滤波器模型,之后通过下面3个步骤最终得到滤波器三维模型的尺寸:

① 通过HFSS单谐振器本征模型仿真使单谐振器本征模频率在 $F_0$ 附近,以此确定每个谐振杆的大小与加载情况。谐振杆长度用 $L$ 表示,则 $L_2 = L_3 = L_4 = 12.75$  mm,  $L_1 = L_5 = 13.05$  mm,谐振杆的截面边长为1.7 mm;

② 通过HFSS双谐振器本征模型仿真得到两两谐振杆间的距离尺寸,本征模仿真公式如下:

$$k'_{i,i+1} = (f_2 - f_1) / (\sqrt{f_2 f_1}), \quad (7)$$

式中, $f_1$ 和 $f_2$ 是双谐振器本征模仿真时2种模的模值,用 $k'_{i,i+1}$ 去逼近式(1)中的 $J_n$ ,步骤①与步骤②交替进行,直至2种模式仿真间的相互影响可忽略不计。最终确定相邻谐振杆间距用 $S$ 表示,则:

$$S_2 = S_{45} = 4.0196 \text{ mm}, S_{23} = S_{34} = 4.91 \text{ mm};$$

③ 对单端输入最大群时延进行仿真,用仿真值去逼近最大群时延的理论值,最后确定玻璃绝缘子探针到谐振杆短路端的距离为6.72 mm。

以上过程,最终得到了滤波器的整体的三维模型及其具体尺寸。进行S参数仿真得到图4所示的曲线。

#### 4.2 性能测试结果分析

应用线切割工艺按模型尺寸加工并组装得到滤波器实物。

通过调谐孔用大头针拨动电容片进行微调,调谐后实际的S11、S21参数曲线如图5所示。

与图5所示曲线相比,在频率、平坦度和抑制度方面,一致性很好,滤波器达到设计要求。

S11曲线偏高是由于输入输出端的加工误差所致,且偏差在允许的范围内。以上所述充分说明通过技术改进确实实现了精确微调谐腔体带通滤波器的设计。

### 5 结束语

综上所述,通过优化计算过程,采用整体模型仿真和新式微调谐结构,提高了模型仿真的精确度,实现了免调谐螺钉的腔体带通滤波器的微调谐设计。这种基于HFSS精确仿真的设计方法,对于腔体滤波器的设计从严重依赖于人的设计经验与调谐经验的现状中走出,起着非常重要的引导与启示作用。基于上述新的设计方法,随着加工工艺水平的不断提高,腔体带通滤波器必将实现真正的免调谐。

#### 参考文献

- [1] 本祯,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计[M].北京:科学出版社,1973:132-144.
- [2] 王清芬,马廷爽.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.
- [3] 王清芬,马廷爽.应用HFSS设计40 MHz腔体滤波器[J].无线电通信技术,2008,44(12):44-46.
- [4] 王琦.基于散射参数法的波导滤波器设计[J].无线电工程,2011,41(6):62-64.
- [5] 林为干.微波网络[M].北京:国防工业出版社,1978:114-148.
- [6] JIA Sheng-hong, LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications [M]. New York, USA: John Wiley&Sons, Inc,2001.

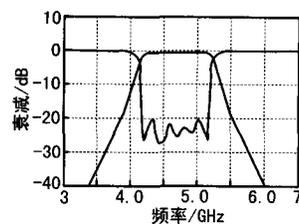


图4 滤波器实例S11、S21仿真曲线

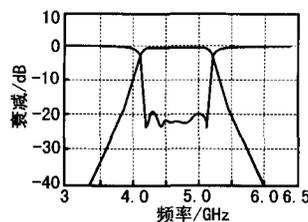


图5 滤波器实例S11、S21测试曲线

## 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>