

# 一种新型的腔体滤波器设计分析

王清芬, 殷素杰, 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** 针对腔体滤波器的工程设计, 分析了 Designer 和高频结构仿真软件 (HFSS) 的相互补偿作用, 提出了一种全新的设计方法—网络参数分解法, 详细论述了应用 Designer 进行原理仿真、HFSS 整体验证以及同时应用这 2 个软件进行元件仿真的设计过程。给出一个 Ku 频段低通滤波器的设计实例, 仿真结果表明, 这种设计方法思路简单, 设计效率高, 结果更精确。

**关键词** HFSS; Designer; 网络参数; 原理图

中图分类号 TN713 文献标识码 A 文章编号 1003-3106(2012)06-0062-03

## A Novel Design of Cavity Filter

WANG Qing-fen, YIN Su-jie, MA Yan-shuang

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

**Abstract** Based on the engineering design of microwave filters, the mutual compensation effect of HFSS and the Designer is analyzed, and a novel design based on network parameter decomposing is presented. The design process is discussed in detail, including elementary diagram simulation by Designer, overall verification by HFSS, and simulation based on both Designer and HFSS. Finally, a design case of a lowpass filter in Ku-band is given. Simulation results show that this method provides simplified concepts, higher efficiency and better precision.

**Key words** HFSS; Designer; network parameter; elementary diagram

## 0 引言

在经典的微波腔体滤波器设计方法中, 不同的滤波器有不同的设计公式和图表, 即使对于同种滤波器, 结构形式不同, 设计方法也大不相同。近年来, 发展起来的众多电磁场仿真软件中, HFSS 和 CST 微波工作室适用于任意结构电磁场的计算, Wasp-Net 和 mWave Wizard 等倾向于各种具体滤波器的仿真设计。对于前者, 不仅对封闭边界电磁场有精确的解, 同样适合开放边界电磁场的求解, 但需要更多的时间和更高的计算能力, 对变量的调试和优化也非常困难; 对于后者, 针对性强, 设计简单、快捷是其优点, 缺点是局限性强, 不能涵盖各种滤波器结构的微小改进和变形。如何利用现有的设计资源, 通过合理的整合, 使得腔体滤波器的设计既灵活快捷, 又具有较高的精度, 正是追求的目的所在。

## 1 总体设计

### 1.1 基本原理

一种双终端低通原型滤波器的梯形电路如图 1 所示。图中  $g_0, g_1, g_2, \dots, g_n, g_{n+1}$  是电路中各元件的

数值, 由网络综合法得出的。

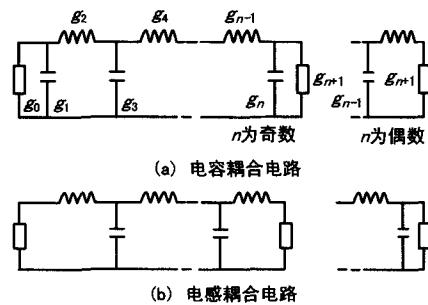


图 1 低通原型滤波器的电路

图 1(a) 和图 1(b) 电路互为对偶, 二者都可用作低通原型滤波器, 其响应相同。图中各元件的物理意义如下:

$$g_0 = \begin{cases} \text{若 } g_1 = C_1', \text{ 则为信号源的电阻 } R_0'; \\ \text{若 } g_1 = L_1', \text{ 则为信号源的电阻 } G_0'; \end{cases}$$

$$g_k|_{k=1 \sim n} = \begin{cases} \text{串联电感} \\ \text{或并联电容} \end{cases}$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} \text{若 } g_n = C_n', \text{ 则为负载电阻 } R_{n+1}'; \\ \text{若 } g_n = L_n', \text{ 则为负载电阻 } G_{n+1}' \end{cases}$$

在实用中, 通常都把低通原型的元件数值对  $g_0$

收稿日期: 2012-03-05

归一化,而频率对  $\omega_1$  归一化,即  $g_0 = 1, \omega_1' = 1$ 。基于此低通原型滤波器的电路,通过简单的频率变换就可方便得到带通、高通和带阻等滤波器的原型电路。

### 1.2 网络参数的选择

对于串联阻抗,其传输矩阵参数为:  $A = 1, B = Z, C = 0, D = 1$ 。根据导纳矩阵与传输矩阵的转换关系<sup>[1]</sup>,可方便得到串联阻抗的导纳参数矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & -\frac{1}{Z} \\ -\frac{1}{Z} & \frac{1}{Z} \end{bmatrix}.$$

对于并联导纳,其传输矩阵参数为:  $A = 1, B = 0, C = Y, D = 1$ 。根据导纳矩阵与传输矩阵的转换关系<sup>[1]</sup>,可方便得到串联阻抗的阻抗参数矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y} & \frac{1}{Y} \\ \frac{1}{Y} & \frac{1}{Y} \end{bmatrix}.$$

从上述的矩阵表述来看,实际应用时串联阻抗使用导纳参数矩阵,并联导纳使用阻抗参数矩阵简单易操作。

### 1.3 设计步骤

应用网路参数分解法设计腔体滤波器的设计方法归结为:“1个基础”,即以软件仿真为基础平台,摒弃手工计算的“公式和图表”;“2个软件”,即一维网络参数仿真软件 Designer 和三维电磁场仿真软件 HFSS;“4个步骤”,即腔体滤波器的设计步骤如下:

① 根据系统要求,在 Designer 中建立原理图并进行仿真。

② 将在 Designer 中建立的原理图分解(可以有多种分解方法)为各个“元件”,单独仿真它们的网路参数;同时在 HFSS 中建立相应元件的结构模型进行仿真,找到与 Designer 中网路参数相等时的结构参数,得到初值;并以初值为中心完成结构变量参数化扫描。

③ 将在 HFSS 中建立的这些元件模型文件插入到 Designer 中进行整体级联,仿真得到 S 参数曲线。如果仿真结果不满足系统指标要求,则根据步骤②参数扫描结果对各个变量进行调谐或优化,最终得到满意的电气指标曲线,获得各个变量的结构尺寸。

④ 根据步骤③的结构尺寸,在 HFSS 中建立腔体滤波器的整体模型,并进行分析验证,其仿真结果应该与 Designer 的电气指标曲线完全吻合。

## 2 关键技术

### 2.1 原理图的建立

除去低通或高通原型滤波器可直接建立原理图外,利用导抗变换器(阻抗变换器或导纳变换器)以及相应特征的谐振器建立原理图是滤波器设计的重要也是关键的一步。

首先确定滤波器的结构形式和类型,然后必须在 Designer 中建立与之对应的原理图并进行仿真。集总参数滤波器或者半集总参数滤波器(如阶梯阻抗式低通滤波器及类似这种结构的滤波器形式),在 Designer 中建立原理图时,提取集总元件进行二端口级联就可以轻松获得;对于形式多样的分布参数滤波器形式,要想在 Designer 中建立满意的符合要求的原理图则需要根据滤波器的结构形式,选择合适的元件进行等效,如应用 1/4 波长传输线来等效同轴腔谐振器,用 1/2 波长波导段来等效波导谐振腔等。

### 2.2 元件模型的分解

划分界面的选择:此界面也可称为等效面,它的设定使得组成滤波器的各元件可以有效切分;探测端口位置的选择:整体模型被分解为元件后,有些部分如导抗变换器,并不能直接进行二端口仿真,这样就要求引入探测端口进行耦合,才能等效得出所需的网路参数。

网路参数分解法既利用了 Designer 的一维计算速度,又在 HFSS 中保证了结果的精度,做到了二者的完美结合。用这种方法设计的滤波器,在合适的加工精度范围内,可在免调谐的情况下,得到相当满意的特性曲线。

## 3 设计实例

### 3.1 Designer 原理图仿真

根据要求的指标,截止频率  $f_c = 15$  GHz,选择  $n = 9$ ,通带波纹 0.021 1,归一化元件值由 Designer 可方便得出:

$$g_1 = 0.909\ 939\ 56 = g_9; g_2 = 1.453\ 152 = g_8; g_3 = 1.886\ 598\ 5 = g_7; g_4 = 1.704\ 007\ 2 = g_6; g_5 = 1.977\ 414\ 8.$$

低通原型滤波器经过频率和阻抗的 2 次反归一,在 Designer 软件中建立原理图并仿真,其幅频特性曲线如图 2 所

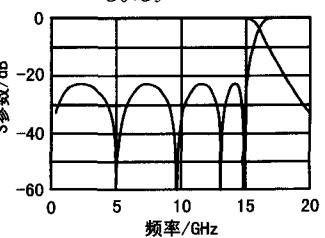


图 2 Designer 仿真幅频特性

示,相应的原理图如图 3 所示。其中,  $Z_0 = 50$ ,  $Y_0 = 1/Z_0$ ,  $W_c = 2\pi f_c$ 。

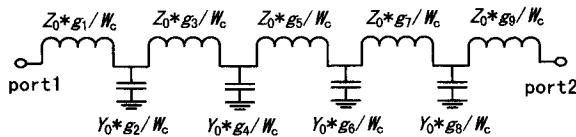


图 3 Designer 仿真原理图

### 3.2 元件仿真分析

#### 3.2.1 Designer 中元件仿真

首先将图 2 所示的 Ku 波段低通滤波器原理图进行拆分,并在 Designer 中分别建立单个的并联电容或串联电感的电路图,可以得到表 1 所示的导纳或阻抗参数值。其他腔体的值可由滤波器的对称特性同时得到。

表 1 单个元件的参数值

第 1 腔	第 2 腔	第 3 腔	第 4 腔	第 5 腔
$Y_{11}/mS$	$Z_{11}/\Omega$	$Y_{11}/mS$	$Z_{11}/\Omega$	$Y_{11}/mS$
21.99	30	10.6	29.34	10.11

#### 3.2.2 HFSS 中元件模型仿真

经典的阶梯阻抗低通滤波器内外导体均采用圆柱形,且外导体的直径保持不变,所以阻抗变化只能达到 10 倍左右。而采用特殊的结构形式,内外导体尺寸同时改变,可使阻抗比大大增加,提高了阻带宽度。

高阻抗线实现串联电感时,采用方形,结构尺寸:外导体  $3.6\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$ ,内导体  $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ ;低阻抗线实现并联电容时,用矩形,结构尺寸:外导体  $3.6\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ ,内导体  $3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 。内外导体均采用良导体,给定合适的长度,将仿真结果与表 1 所示的参数值对比,可得到滤波器的各元件模型的长度初值如表 2 所示。其他腔体的值由滤波器的对称特性得到。同时建立阻抗阶梯和输入输出模型(人口  $50\Omega$ ),以满足下一步整体级联仿真的需要。

表 2 单个元件模型的长度初值(单位:mm)

第 1 腔	第 2 腔	第 3 腔	第 4 腔	第 5 腔
1	0.9	1.9	1.05	2

#### 3.2.3 参数扫描

用高阻抗线来实现串联电感,用低阻抗线来实现并联电容时,由于阻抗阶梯的存在,级联时可能需要微调其长度尺寸,所以设定各个元件模型的长度为变量  $L$ ,进行参数扫描,扫描范围以腔体长度初值为中心点向两边辐射,扫描的精度与实际尺寸有关,

并考虑加工工艺水平,这里采用步长  $0.01\text{ mm}$ 。

### 3.3 整体仿真及验证

#### 3.3.1 Designer 级联仿真

在 Designer 中导入 HFSS 文件,整体级联,利用参数扫描曲线,反复调整  $L$  值得出理想的幅频特性曲线,确定 Ku 波段低通滤波器各元件的长度值如表 3 所示。其他腔体的值由滤波器的对称特性得到。

表 3 低通滤波器各元件长度值(单位:mm)

第 1 腔	第 2 腔	第 3 腔	第 4 腔	第 5 腔
1.1	0.85	2	1.04	2.1

#### 3.3.2 HFSS 整体验证

对其进行仿真,结果与 Designer 整体级联仿真结果一致,验证了这种方法的正确性。仿真结果如图 4 所示。

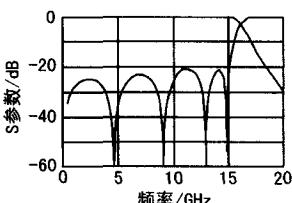


图 4 低通滤波器幅频特性

## 4 结束语

应用网络参数分解法设计 Ku 频段低通滤波器,突破传统的思路,使设计效率和精度较以往大大提高;且每一步操作都在可控范围内,在有限的计算资源条件下达到最快的设计。这种新型的微波滤波器设计方法,将进一步完善滤波器的设计体系,使其更加统一。此法除了适用上述的类似阶梯阻抗式低通滤波器,也可以用来设计其他类型的微波腔体滤波器,只要能够在 Designer 中建立元件可切分的原理图,便可以完成整个设计。此方法的应用将大大提升本行业的设计精度和水平。

## 参考文献

- [1] HONG JIA-sheng, LANCASTER M. J. Microstrip Filters for RF/ Microwave Applications [M]. New York: John Wiley&Sons, Inc, 2001.
- [2] 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.
- [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.
- [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.

## 作者简介

王清芬 女,(1979—),工程师。主要研究方向:微波散射通信。

## 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，致力于专注于微波、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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

**易迪拓培训**

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>