

# 曲线拟合法在管状滤波器设计中的应用

吴边 苏涛 杨波 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 本文提出了一种基于 S 参数曲线拟合的新的管状滤波器设计方法, 给出了由低通原型到管状带通滤波器的综合过程, 并用实例介绍了采用逐步级增思想设计管状滤波器的曲线拟合方法。该方法既保证了仿真过程中串联元件值的准确性, 又克服了并联元件值影响因素太多的缺点, 降低了优化过程中物理尺寸的设计难度。

**关键词:** 管状滤波器 曲线拟合 逐步级增

## 1 引言

管状滤波器具有插损小、结构紧凑、相对带宽宽和功率容量大等优点, 特别在超短波频段得到了广泛应用。[1]中给出了端接电容管状滤波器原理图(图 1), 并针对各元件值随频率变化的情况给出了综合公式。本文将给出端接电感管状滤波器(图 2)的综合过程。

管状滤波器的物理结构实现一直是设计中的难点。传统的设计方法往往将管状滤波器的各部分独立出来进行单级优化, 最后合并成全电路进行局部修正。这种方法忽略了各级之间的相互影响, 在级数较多时, 误差的积累使得整体电路的性能恶化, 而在全电路基础上进行修正时影响因素太多, 大大增加了仿真优化的复杂度。

本文提出了一种采用逐步级增思想设计管状滤波器的曲线拟合技术, 从第一级出发, 每增加一个元件, 就把 Ansoft HFSS 物理尺寸参数扫描结果与 Microwave Office 的目标曲线进行拟合, 依次得到各元件的最佳尺寸, 最终完成整个滤波器的设计。

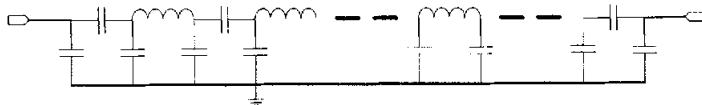


图 1 端接电容管状滤波器原理图

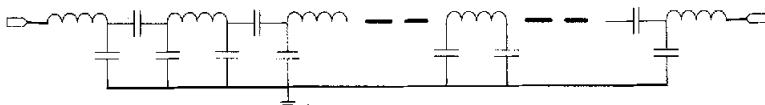


图 2 端接电感管状滤波器原理图

## 2 管状滤波器综合过程

如图 3 所示的管状滤波器可以看作是由谐振回路和 J 变换器组成的, 其中滤波器中间的谐振回路是电感两侧端接并联电容的  $\Pi$  型谐振电路, 两端是端接 LC 谐振回路。

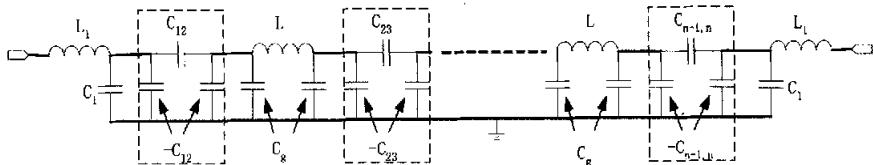


图 3 谐振回路和 J 变换器组成的管状滤波器原理图

由于滤波器对称, 各个  $\Pi$  型谐振电路是相同的, 端接 LC 谐振电路也相同。根据[2]有

$$k_{j,j+1} = \frac{J_{j,j+1}}{\sqrt{b_j b_{j+1}}} = \frac{\omega_0 C_{j,j+1}}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} = \frac{w}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (1)$$

其中,  $g_j$  是归一化低通原型的元件值。Π型谐振电路和端接 LC 谐振回路的电纳斜率分别为:

$$b_1 = \left. \frac{\omega_0}{2} \frac{dB}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{2C_g \omega_0 \omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega_p^2} \quad (2)$$

$$b_2 = \left. \frac{\omega_0}{2} \frac{dB}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = C_1 + \frac{L_1^3 \omega^2 - L_1 R^2}{(R^2 + L_1^2 \omega^2)^2} \approx \frac{1}{L_1 \omega_0} \quad (3)$$

$\omega_0$  为滤波器通带中心频率,  $\omega_p$  为电感与单侧电容的谐振频率。进一步有

$$C_{j,j+1} = \frac{w \cdot b_1}{\omega_0 \cdot \sqrt{g_j g_{j+1}}}, \quad j = 2, \dots, n-2 \quad (4)$$

$$C_{12} = C_{n-1,n} = \frac{w \cdot \sqrt{b_1 b_2}}{\omega_0 \cdot \sqrt{g_1 g_2}} \quad (5)$$

对于端接谐振回路, 有

$$Q_e = \frac{g_0 g_1}{w} = \frac{\omega_0 L_1}{R} \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{g_0 g_1 R}{w \cdot \omega_0} \quad (7)$$

于是, 管状滤波器的综合可以归纳如下:

- (1) 确定 Π 型谐振电路的电感  $L$ , 并得到电容  $C_g$ ;
- (2) 由 (7) 得到端接谐振回路的电感  $L_1$ , 继而得到  $C_1$ ;
- (3) 由 (4) 和 (5), 得到耦合电容  $C_{j,j+1}$ 。

### 3 管状滤波器的结构实现

#### 3.1 串联元件的曲线拟合

在管状滤波器中, 采用螺旋线圈作为串联电感, 介质盘片作为串联电容, 金属盘片与同轴线外导体构成并联电容。在设计中, 通过 Ansoft HFSS 仿真出不同匝数的串联电感和不同厚度的串联电容的响应, 然后与 Microwave Office 对应的原理电路进行曲线拟合, 得到其等效的电感和电容值。

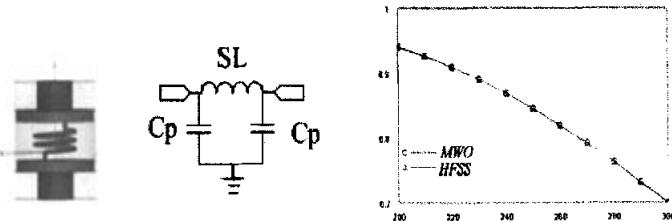


图 4 (a) 串联电感结构及其等效电路 (b) 串联电感的 S 参数拟合曲线

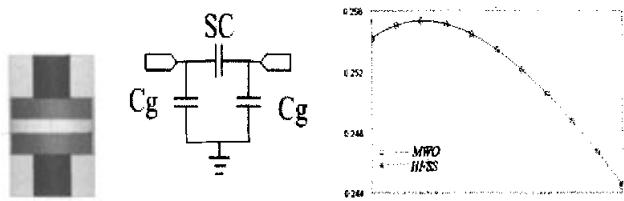


图 5 (a)串联电容结构及其等效电路 (b) 串联电容的 S 参数拟合曲线

研究发现，在一定的频段范围内，串联电感和串联电容相对独立，一般来说串联电感值与螺旋线圈匝数成线性关系，串联电容值与两圆盘距离的倒数成线性关系。在 200~300MHz 时通过插值方法我们得到串联电感与线圈长度的关系式为  $L = 12.713l - 24.32$ ；串联电容值与介质厚度的关系式为  $C = -0.5411 + 11.7427/h$ 。一旦串联电感和串联电容值给定，很方便的就能得出其对应的物理尺寸。

### 3.2 并联元件的曲线拟合

在 HFSS 仿真过程中，串联电感和串联电容的值比较稳定，一般不随两端金属盘片的厚度变化而改变，于是在确定并联电容时固定串联值，而将每级电路中新增的金属盘片取不同厚度时的参数扫描响应与原理电路响应进行曲线拟合，依次确定并联电容的尺寸。

图 6(a)给出了第一级的结构及其等效电路，此时只有  $C_1$  是未知量，对中间金属盘片的厚度进行参数扫描，与原理电路曲线拟合（如图 6(b)），即可提取出目标值对应的厚度。在此基础上增加一级电感（如图 7(a)），对未知量  $C_2$  进行拟合（图 7(b)），进而提取出目标值  $C_2$  对应的厚度。如此递增，可以进一步得到未知量  $C_3$ 、 $C_4$  的厚度（图 8）。

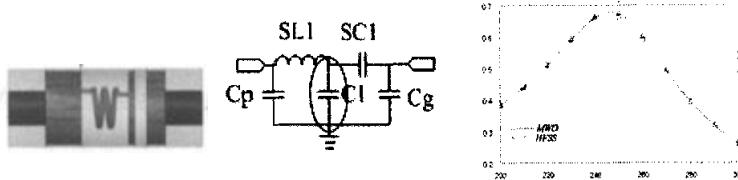


图 6 (a) 第一级结构及其等效电路 (b) 第一级的 S 参数拟合曲线

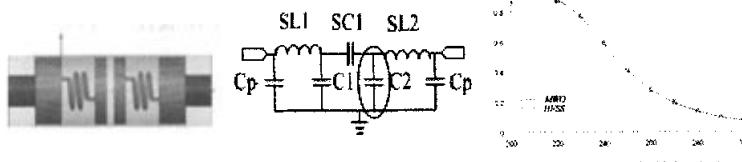


图 7(a) 前两级结构及其等效电路 (b) 前两级的 S 参数拟合曲线

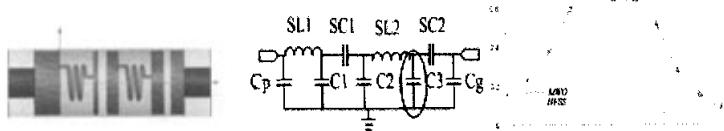
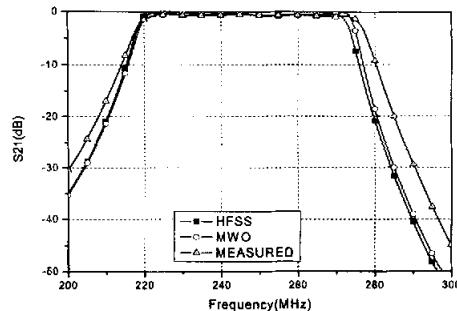


图 8(a) 前三级结构及其等效电路 (b) 前三级的 S 参数拟合曲线

再根据电路的对称性，即可得到全电路的物理结构尺寸。由于每一步都严格控制了尺寸误差，全电路的仿真曲线与原理电路曲线比较吻合。而且复杂的参数优化过程都在级电路中完成，这就比全电路优化节省了大量的时间，降低了计算机仿真的内存要求。



图 9(a) 管状滤波器实物照片



(b) 实测曲线与仿真曲线比较

图 9(a)给出了加工出来的管状滤波器实物图, 使用矢量网络分析仪测量发现, 只需对螺旋线圈和并联电容做适当的微调, 就可以得到比较理想的宽带滤波特性。由图 9(b)可以看出, 管状滤波器在很宽的通带范围内插损小于  $1\text{ dB}$ , 高端  $10\%$  带外抑制度大于  $50\text{ dB}$ , 考虑到金属和介质本身的损耗, 除带外陡度略差一些之外, 实测曲线与设计目标吻合得很好。

#### 4 结语

本文首先给出了端接电感管状滤波器的综合过程, 然后提出了采用曲线拟合方法提取元件值的结构设计思路, 并重点介绍了采用逐步级增思想设计管状滤波器的曲线拟合过程。该方法简单实用, 提高了设计的准确度, 降低了设计的复杂度, 对于工程实践有一定的借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] Direct Synthesis of Tubular Bandpass Filters with Frequency-dependent Inductors, Qiang Huang, Ji-Fuh Liang, Dawai Zhang and Guo-Chun Liang
- [2] Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, New York:McGraw Hill 1964
- [3] Narrowband Lumped-Element Microstrip Filters Using Capacitively-Loaded Inductors, Dawei Zhang, Guo-Chun Liang, Chien-Fu ,IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, pp. 3030–3036, Dec. 1995.
- [4] 《现代微波滤波器的结构与设计》 甘本被 吴万春编 科学出版社 1973

## 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>